

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE
TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN:

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL
DE BAJA RADIACIÓN TRASERA

AUTOR: IRIA GALLEGO GALLEGO
TUTOR: EVA RAJO IGLESIAS
DIRECTOR: ÓSCAR QUEVEDO TERUEL

LEGANÉS, ENERO DE 2011

Proyecto Fin de Carrera
DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL DE BAJA RADIACIÓN TRASERA

Autor
IRIA GALLEGO GALLEGO

Tutora
EVA RAJO IGLESIAS

Director
ÓSCAR QUEVEDO TERUEL

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 14 de Enero de 2011, siendo evaluada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: DR. LUIS INCLÁN SÁNCHEZ

SECRETARIO: DANIEL GARCÍA DOÑORO

VOCAL: JULIO VILLENA ROMÁN

y habiendo obtenido la siguiente CALIFICACIÓN:

LEGANÉS, A 14 DE ENERO DE 2011

Contenido

Agradecimientos	VII
Prefacio	IX
1. Estado del Arte	1
1.1. Tecnología/Tipo de antena	2
1.2. Técnicas de alimentación de antenas de parche.	3
1.3. Materiales usados para la construcción de la antena	7
1.4. Frecuencias de operación	9
1.5. Parámetros de diseño deseados para la antena	10
1.6. Condiciones a las que someter a una antena textil.	11
2. Estudio y elección de los materiales	13
2.1. Estudio de los materiales para construir una antena textil	13
2.2. Elección de los materiales para diseñar una antena textil	16
3. Superficies Soft y Hard	17
3.1. Breve estudio de las superficies Soft y Hard	17
3.2. Estudio y caracterización de superficies soft en tecnología microstrip	20
3.2.1. Estructura Rectangular	21
3.2.2. Estructura Circular	29
4. Diseño de la antena	35
4.1. Introducción a las antenas microstrip	35
4.2. Diseño de la antena	37
5. Antena y superficie Soft	43
6. Conformado de la antena y la superficie Soft	51
7. Análisis de la antena sobre el modelo de cuerpo humano	55
7.1. Descripción del modelo de cuerpo humano	55

7.2. Análisis de la antena sobre el modelo de cuerpo humano	56
8. Resultados experimentales	61
9. Conclusiones y futuras líneas de trabajo	65
9.1. Conclusiones	65
9.2. Futuras líneas de trabajo	66
Apéndices	
A. Relación entre los parámetros $p1$ y $p2$ de una superficie Soft circular	71
B. Presupuesto	73
B.1. Costes	74
Bibliografía	80

AGRADECIMIENTOS

Aunque solo sean unas palabras entre cientos de ellas quisiera que estas destacaran para agradecer enormemente el trabajo y dedicación brindado por el director de este proyecto, el Dr.Óscar Quevedo, ha sido un lujo haber podido trabajar y aprender contigo, de corazón. También quisiera agradecerle a la Dra.Eva Rajo su apoyo y entrga desde el principio de este trabajo.

Comencé este camino que hoy llega a su fin junto a unos compañeros de clase, hoy amigos, a los que me gustaría agradecerle su apoyo, amistad y empatía a lo largo de estos años de carrera, muchas gracias a todos y cada uno de vosotros por lo que me habéis enseñado y ayudado para que esto fuera posible.

A mis amigos, a los de siempre, a los de no tan siempre pero como si lo fueran, y especialmente a Cristina, Aída, Ana y Manu que de una manera u otra habéis sido partícipes del desarrollo, no solo de este trabajo, pero de toda una vida.

Quisiera darle las gracias a Elena y familia por estar ahí siempre que los he necesitado y por el entusiasmo y amor que me transmitís.

Gonzalo, no tengo palabras para ti, no existen. Tú eres quien me ayuda a levantarme en los momentos más bajos, quien salta conmigo en los de alegría, quien me escucha pacientemente y quien me entiende. Gracias, gracias, gracias.

Y en un lugar muy importante el más grade de los agradecimientos para mi familia. Mamá, papá, Alba, abuelos millones de gracias de corazón porque ni esto, ni nada, hubiera sido posible sin vosotros.

Gracias.

PREFACIO

Este proyecto surge de las necesidades que afloran día a día en una sociedad cada vez más dependiente de las nuevas tecnologías y sus aplicaciones. No es novedad mencionar que existe una tendencia clara hacia las redes de área personal, redes desplegadas en las proximidades del propio cuerpo humano. Estas redes, al igual que las de extensiones más amplias, necesitan de sus sistemas de recepción y transmisión, que a su vez, constan de antenas. Idealmente, interesaría poder embeber estas antenas en las prendas de vestir, por lo que, durante los últimos años, se ha estudiado como emplear materiales textiles para el diseño de las propias antenas. No sorprenden ya las cazadoras con auriculares incluidos y botones para poder manejar el mp3, ni zapatillas que hacen vibrar la izquierda o la derecha para indicar una dirección a modo de navegador, por lo tanto, resulta coherente e intuitivo que el siguiente paso sea la inclusión de antenas, y sus consecuentes sistemas de recepción, en las prendas de vestir.

Un requisito importante de estas antenas textiles brota de su propia naturaleza, ya que si su finalidad es ir adheridas o embebidas en las prendas de vestir, la radiación trasera de la antena será desperdiciada con lo que se debe buscar un nivel alto de radiación delantera para obtener una antena lo más eficiente posible. Por lo tanto, en este trabajo se busca diseñar una antena de parche con materiales textiles de uso más o menos cotidiano y que además goce de una baja radiación trasera. Para este segundo objetivo se utilizará una superficie periódica, una superficie soft en tecnología microstrip, que ya ha sido utilizada con finalidades similares (es decir, eliminar ondas de superficie para reducir el nivel de radiación trasera), pero con la diferencia de que en este caso dicha superficie debe ser flexible.

Dicho diseño se ha realizado para la banda ISM de 2.4GHz-2.5GHz de uso abierto para aplicaciones militares, médicas y de servicios. Entre las aplicaciones más populares

de dicha banda se encuentran las comunicaciones por WLAN y WPAN. Dicha banda es de uso libre y deben respetarse unos niveles máximos de potencia transmitida.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

La aparición de antenas textiles viene originada por varios factores que han impulsado una tecnología capaz de adaptarse a las necesidades de los usuarios de las nuevas redes de comunicación. Entre estos factores se encuentran la evolución de las redes PAN (Personal Area Network) hacia las nuevas redes de área corporal llamadas WBAN (Wireless Body Area Networks). Junto con estas redes aparecen también nuevos protocolos como pueden ser Bluetooth, WiFi, WiMax o UWB que conllevan un notable incremento de las aplicaciones inalámbricas, tanto para comunicaciones como para datos, lo cual hace necesario idear unos sistemas ligeros, flexibles y de fácil integración con el cuerpo humano que permitan moverse libremente y cuyo impacto sea mínimo. Entre las posibles aplicaciones que se espera que aparezcan gracias a estos nuevos sistemas se encuentran sobretodo aquellas incluidas en el campo de la asistencia médica, es decir en la vigilancia continua de parámetros vitales que pueden ayudar a los pacientes que padecen enfermedades crónicas como la diabetes, el asma o las deficiencias cardíacas [Chen, 2007]. De la misma manera serán útiles también en la electrónica, las aplicaciones militares, el ocio, los deportes o la seguridad [Chen, 2007]. Además una red de área corporal nos permitirá unas comunicaciones sin fisuras ya no sólo de humano a humano sino también de humano a máquina y de máquina a máquina por lo que merece la pena ahondar un tanto más en esta tecnología.

Aunque es un campo de investigación relativamente nuevo, (se remonta al año 2005), las investigaciones son cada vez más abundantes y ya se cuenta con una gama considerable de experimentos y prototipos que nos permiten hacer un primer acercamiento a la

tecnología de las antenas textiles. A continuación procederemos a realizar un recorrido introductorio por los distintos aspectos que incumben a una antena textil; éstos son: las tecnologías o tipos de antenas utilizadas, sus técnicas de alimentación, los materiales usados para la construcción, las frecuencias de operación empleadas más habitualmente, las condiciones a las que se somete a una antena textil y por último las prestaciones que suelen proporcionar estos dispositivos radiantes, como son los que se encuentran la ganancia, la eficiencia o el ancho de banda.

1.1. Tecnología/Tipo de antena

Existen tres tipos básicos de antenas que son: las antenas de hilo, las antenas de apertura y las antenas planas. Las más usadas para fabricar antenas textiles se encuentran incluidas en el grupo de las antenas planas por ser más fácilmente integrables en los prendas de vestir y además porque su tecnología permite usar directamente materiales textiles para su fabricación, haciéndolas moldeables a una determinada superficie, en lugar de materiales rígidos como son los metales que dificultan su posterior integración en las prendas.

En las figuras de la 1.1 a la 1.8 se muestran los distintos tipos de antena que han sido empleados por diferentes autores en la literatura para el diseño de antenas textiles. Excepto las antenas que se presentan en las figuras 1.5 y 1.6 son antenas en tecnología puramente microstrip, todas ellas con una estructura planar y compuestas por la superposición de capas de distintos materiales. Sin embargo, las antenas de las figuras 1.5 y 1.6 se han desarrollado con tecnología microstrip pero además incorporando elementos distintos como un botón que comunmente lleva una prenda de vestir y se ha integrado como parte del elemento radiante.

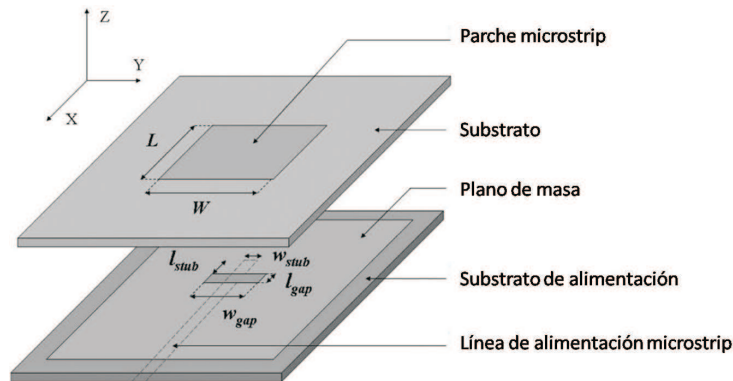


Figura 1.1. ACPA. Aperture Coupled Patch Antenna o Antena de parche acoplada mediante apertura [Hertleer et al., 2007].

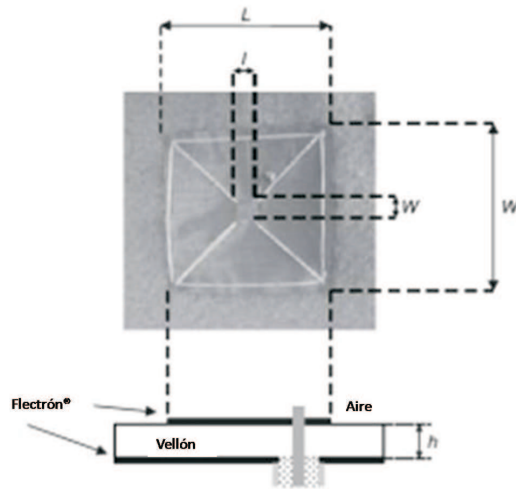


Figura 1.2. Antena textil en tecnología microstrip en forma de anillo rectangular. [Tronquo et al., 2006].

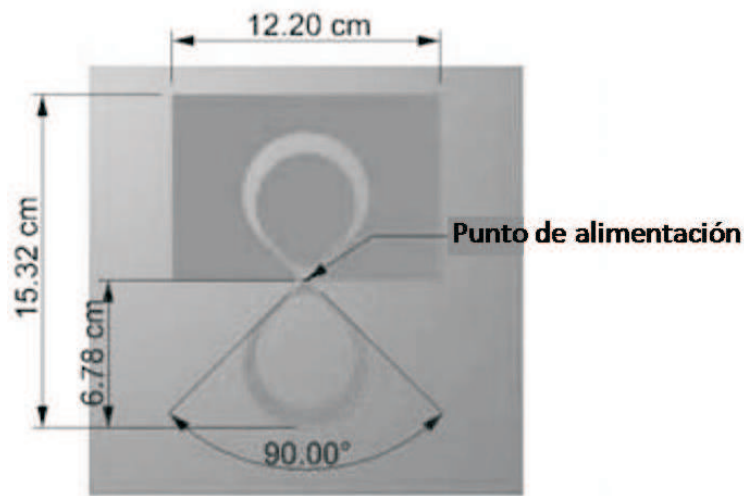


Figura 1.3. Elemento de una antena de textil de banda ancha denominado 8-complementario. [Kennedy et al., 2009].

1.2. Técnicas de alimentación de antenas de parche.

Dado que en la realización de este proyecto nos vamos a centrar en las antenas microstrip de parche, vamos a introducir las técnicas de alimentación más comúnmente empleadas. Existen múltiples maneras de alimentar una antena y cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes. Dependiendo de a qué tipo de antena se alimente, o en qué condiciones, se escogerá una u otra. A continuación se presentarán algunas de las alimentaciones más usadas.

Por ejemplo, en [Ouyang et al., 2005], la alimentación se realiza mediante un cable coaxial rígido, una de las técnicas más básicas y más utilizadas ya que la punta del

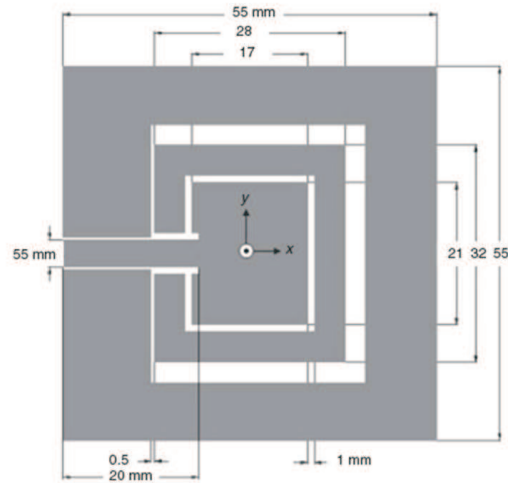


Figura 1.4. Antena textil coplanar de doble banda.
[Bai y Langley, 2009a] y [Bai y Langley, 2009b].

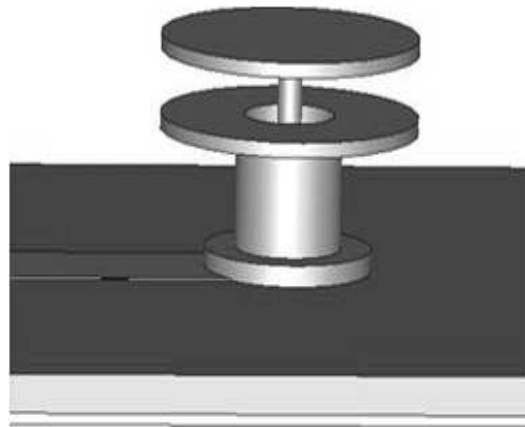


Figura 1.5. Antena de doble banda: tres discos y un poste coaxial. [Sanz-Izquierdo et al., 2006] .

coaxial se podría colocar en cualquier punto de una antena plana para su adaptación y además apenas sufre perturbaciones por radiación no deseada. El inconveniente de este tipo de alimentación para la aplicación que aquí se trata es que no es flexible y que por lo tanto no se adapta a las deformaciones de la tela en cuestión. En la figura 1.9 se observa un esquema de dicha alimentación.

Otra de las alimentaciones más empleadas se realiza mediante una línea de alimentación microstrip en el mismo sustrato de la antena como una extensión del propio parche de la antena microstrip. Esta alimentación se utiliza en [Sanz-Izquierdo et al., 2006], [Floc'h et al., 2009], [Massey, 2001] y [Locher et al., 2006]. Entre las ventajas de este tipo de alimentación encontramos que garantiza una estructura plana no como en el caso del cable coaxial y que permite el montaje de componentes electrónicos directamente

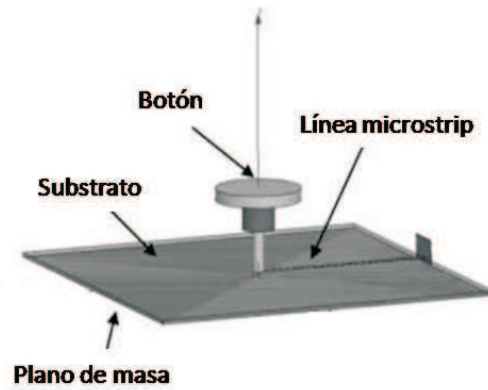


Figura 1.6. Monopolo tridimensional hecho con un botón de pantalón. [Floc'h et al., 2009] .

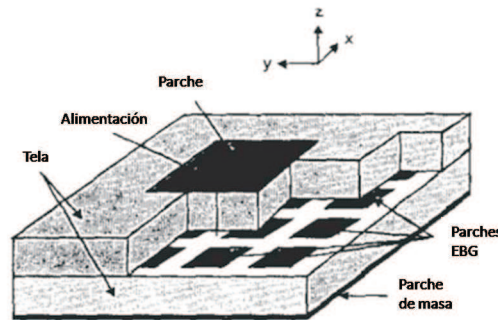


Figura 1.7. Antena de parche sobre una superficie EBG. [Salonen et al., 2004b] .

en la proximidad de la antena. Existen dos inconvenientes destacables, uno viene dado por las posibles radiaciones parásitas de la línea de alimentación y el acoplamiento electromagnético parasitario entre la antena, la línea de alimentación y el transceptor. El segundo inconveniente se origina si se usa un dieléctrico delgado ya que aumenta fuertemente la cantidad de onda superficial y la polarización de alimentación puede tener componentes no deseadas [Ramesh Garg, 2001]. En 1.10 se observa un esquema de dicha alimentación.

Una técnica algo más novedosa consiste en alimentar a la antena mediante una línea microstrip de apertura de acoplamiento (Aperture-Coupled Microstrip Feed). Esta técnica utiliza dos substratos separados por un plano de masa común donde una línea de alimentación microstrip situada en el substrato más bajo es acoplada de manera electromagnética al parche a través de una ranura en el plano de masa común; la ranura puede adoptar cualquier forma o tamaño utilizándose así para mejorar el ancho de banda de la antena. Esta técnica de alimentación es la que se utiliza en la antena textil empleada en [Hertleer et al., 2007]. Véase el esquema en 1.11.

Otra técnica es la denominada CPW (Coplanar Waveguide Fed) o alimentación a

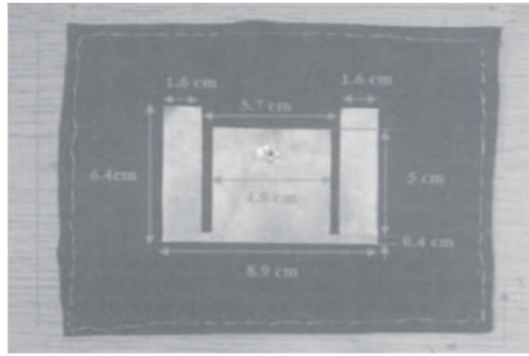


Figura 1.8. Antena microstrip en forma de E. [Salonen et al., 2005]

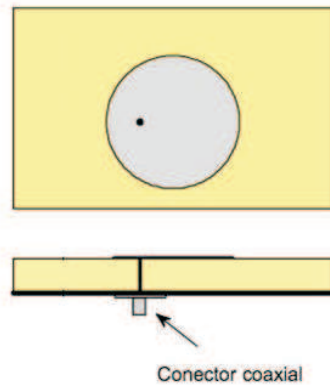


Figura 1.9. Alimentación coaxial.

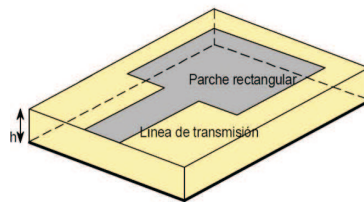


Figura 1.10. Alimentación microstrip.

través de una guía de ondas coplanar que debido al mayor ancho de banda que permite obtener y su menor grado de dispersión [Den et al., 2006], está reemplazando a la alimentación mediante línea microstrip. En este tipo de alimentación el plano de masa se encuentran en el mismo nivel que antena y alimentación. En la figura 1.12 se observa la arquitectura de esta técnica en el caso de alimentar una antena de parche rectangular. Ejemplos de esta alimentación se pueden encontrar en [Bai y Langley, 2009a] y [Bai y Langley, 2009b].

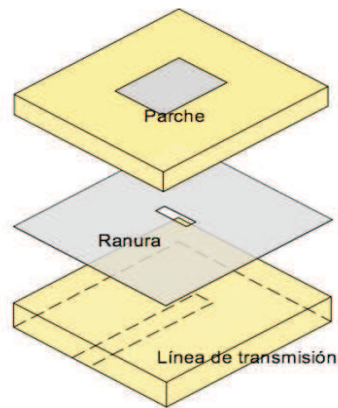


Figura 1.11. Alimentación con línea microstrip de apertura de acoplamiento.

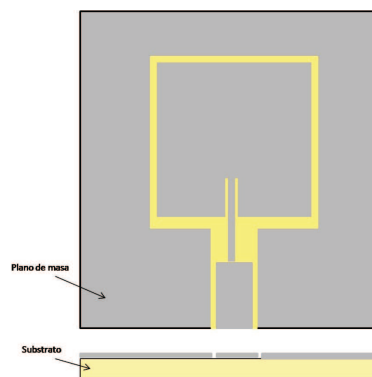


Figura 1.12. Alimentación CPW . (Coplanar Waveguide).

1.3. Materiales usados para la construcción de la antena

Para construir antenas microstrip de parche textiles como las presentadas anteriormente, se necesitan básicamente dos tipos de materiales, uno conductor y otro dieléctrico y que además sean flexibles y moldeables para poder ser integrados en las prendas de vestir. En la literatura existe una gran variedad de materiales que se presentarán de manera muy breve en esta sección. Más tarde se ahondará un poco más en algún tipo de material cuando se realice la elección del mismo, a través del un estudio, para el prototipo de antena textil que se va a diseñar.

Entre los materiales textiles conductores, también conocidos como electrotexiles, se encuentran materiales específicamente diseñados para ello como son: Electron[®], Shieldit[®], Nora[®], Zelt[®] o Cordura[®]. Se puede observar en el cuadro 1.1 un resumen de sus características más destacables. Por otro lado, existen materiales no diseñados específicamente para su uso como electrotexiles pero que pueden cumplir los requisitos; entre estos materiales están los polímeros flexibles, el cobre, los tejidos textiles niquela-

Cuadro 1.1. Tabla de Materiales Electrot textiles.

Material	Resistencia laminar	US\$ por pie	Composición	Procesos	Notas
Flectron	0.1	21.95	Copper Níquel Nylon	Grabar Coser Pin- tar Cortar Soldar	La capa de níquel pre- viene el deslustrado pe- ro el contacto con la piel debe ser evitado ya que es un material que pue- de provocar reacciones alérgicas.
Zelt	0.01	17	Cobre Nylon Estaño	Coser Cor- tar	
Shieldit	<0.1	7	Cobre Ní- quel Nylon Polietileno	Coser Cor- tar Aplicar calor Adesi- vo Sellado Planchado	
Nora	0.03	17.6	Plata Cobre Níquel Nylon	Cortar Co- ser Doblar	Protege contra la corro- sion galvánica

dos y bañados en varios metales como níquel, plata o cobre o el sprays conductores para rociar materiales textiles.

Entre los materiales no conductores, también encontramos aquellos diseñados específicamente para cumplir esta función como Nomex[®], Rhocell[®] o Vecro[®], y materiales relativamente comunes en el uso diario como el vellón, el fieltro, las telas 100 % poliéster o el plástico.

Para la construcción de la antena estos materiales deben ser unidos entre sí para lo cual existen una serie de procesos dependiendo de que tipos de materiales queramos unir. Un proceso es el denominado *art-to-part* para unirlos mediante hilo textil [Kennedy et al., 2009]., otro es utilizar pegamento textil basado en amoníaco [Klemm et al., 2004], mediante una conexión eléctrica a un conector SMA con pegamento conductor de dos componentes [Klemm et al., 2004], usando tejido de raso [Ouyang et al., 2005] o adhesivo textil líquido [Locher et al., 2006], cosiendo [Locher et al., 2006] o por último con láminas adhesivas adheridas mediante planchado [Locher et al., 2006].

Cuadro 1.2. Tabla de frecuencias.

Banda Frecuencial	Frecuencia central
6765-6795 kHz	6780 kHz
433.05-434.79 MHz	433.92 MHz
61-61.5 GHz	61.25 GHz
122-123 GHz	122.5 GHz
244-246 GHz	245 GHz
13553-13567 kHz	13560 kHz
26957-27283 kHz	27120 kHz
40.66-40.70 MHz	40.68 MHz
902-928 MHz	915 MHz
2400-2500 MHz	2450 MHz
5725-5875 MHz	5800 MHz
24-24.25 GHz	24.125 GHz

1.4. Frecuencias de operación

Estas antenas están diseñadas para trabajar en varias bandas de frecuencia. Una de las bandas es la denominada GSM/PCS, ejemplo de ello se observa en [Massey, 2001] donde el diseño funciona desde los 880 a los 960MHz. Otra banda muy utilizada debido a las potenciales aplicaciones que tienen este tipo de antenas es la banda ISM, la cual no necesita licencia y está destinada a usos industriales, científicos y médicos. ISM es un término para reunir a varias bandas de frecuencia que vienen especificadas en el artículo 5 de Radio Regulations"Volume 1 [ITU-International Telecommunication Union Web Site, 2010]. En el cuadro 1.2 se resumen dichas bandas frecuenciales.

Es importante destacar que estas bandas de frecuencias sufrirán grandes interferencias debido a las diferentes aplicaciones utilizadas en la banda ISM. Algunos ejemplos del uso de estas frecuencias en la banda 2400-2500 MHz [ITU-International Telecommunication Union Web Site, 2010], son: [Tronquo et al., 2006], [Kennedy et al., 2009], [Salonen et al., 2004b], [Ouyang et al., 2005], [Bai y Langley, 2009b], [Bai y Langley, 2009a], [Sanz-Izquierdo et al., 2006] y [Ouyang et al., 2005]. En [Bai y Langley, 2009b], [Bai y Langley, 2009a], [Sanz-Izquierdo et al., 2006] y [Ouyang et al., 2005] se diseñan antenas duales que trabajan en la banda la banda 2400-2500 MHz mencionada anteriormente y en la banda 5725-5875 MHz. También encontramos antenas textiles de aplicaciones militares trabajando en las bandas SHF y EHF [DeJean et al., 2005].

1.5. Parámetros de diseño deseados para la antena

Como se comentó anteriormente, en este apartado trataremos fundamentalmente de valores de ancho de banda, ganancia y eficiencia, lo que por consiguiente nos llevará a hablar de directividad.

Comencemos por los valores de ancho de banda. Para comparar todos los datos con un mismo patrón se suele emplear el límite de Chu [Ziolkowski y Erentok, 2007] como barómetro a la hora de decidir si un ancho de banda es mejor que otro y cual es el rango alcanzado en este tipo de antenas. En la ecuación 1.1 se define el ancho de banda fraccional y en la ecuación 1.2 el máximo ancho de banda fraccional dado por el límite de Chu.

$$FBW_{-3dB} = \frac{\Delta f_{-3dB}}{f_{0dB}} \quad (1.1)$$

$$FBW_{Chu} = \frac{(ka)^3}{[1 + (ka)^2]} \quad (1.2)$$

Donde k es $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y a es el diámetro de la esfera en la que se circunscribe la antena.

En la mayoría de los artículos citados en la bibliografía se menciona el ancho de banda para el cual el parámetro S_{11} permanece por debajo de los -10 dB. Es por ello que utilizaremos también esta expresión del ancho de banda a modo comparativo. También utilizaremos el parámetro S_{11} para obtener el Δf_{-3dB} para así poder hacer la comparación con el límite de Chu. Cabe destacar antes de continuar que no se ha tenido en cuenta la eficiencia de la antena para el análisis del límite de Chu.

Una vez visto esto procedamos a analizar algunos de los artículos en los que hay información suficiente para obtener los datos de ancho de banda.

En [Cibin et al., 2004] se consigue un $FBW_{-10dB}=0.25$ y un $FBW_{-3dB}=0.33$ mientras que el límite de Chu en este caso se fija en 1.29. En [Hertleer et al., 2007] el FBW_{-10dB} es de 0.078 y el FBW_{-3dB} es de 0.41 en este caso el límite de Chu es de 2.96. En [Sanz-Izquierdo et al., 2006] se utilizan dos frecuencias de funcionamiento. En el primer caso, para $f_0=2.4\text{GHz}$, se consigue un $FBW_{-10dB}=0.06$ y un $FBW_{-3dB}=0.20$ mientras que el límite de Chu en este caso se fija en 4.05. Para la segunda frecuencia de funcionamiento, situada en 5.2 GHz se consigue un $FBW_{-10dB}=0.27$ y un $FBW_{-3dB}=0.44$ el límite de Chu también varía llegando a 9.25. En [Bai y Langley, 2009a] también se utilizan dos frecuencias de funcionamiento, la primera es de $f_0=2.45\text{GHz}$ y con ella se alcanza un $FBW_{-10dB}=0.06$ y un $FBW_{-3dB}=1.122$ colocándose el límite de Chu en 41.69. Para la segunda frecuencia de funcionamiento situada en 5.2 GHz se llega a un FBW_{-10dB} de 0.13 y un FBW_{-3dB} de 0.35 junto con un FBW_{Chu} igual a 94.4. Otro artículo del cual se puede obtener esta información es [Tronquo et al., 2006] donde el

FBW_{-10dB} es de 0.069 y el FBW_{-3dB} es de 0.122. Para esta antena en forma de anillo rectangular el límite de Chu se establece en 0.284.

A modo de resumen podemos decir que los valores de FBW_{-10dB} que se observan oscilan entre un 6 % y un 27 % para los casos más altos. Es necesario de todas maneras observar el porcentaje de diferencia del FBW_{-3dB} con el límite de Chu. El peor caso se da en [Bai y Langley, 2009a] donde el valor del FBW_{-3dB} se queda en un 2.6 % del límite de Chu para la primera frecuencia y ni siquiera llega al 0.5 % en el caso de la segunda frecuencia de funcionamiento. Se supera este valor aunque no con creces en [Sanz-Izquierdo et al., 2006] donde en ninguno de los dos casos el valor del ancho de banda a 3 dB llega a estar por encima de un 5 % del valor del límite de Chu. Aumenta hasta un 13.85 % la antena de [Hertleer et al., 2007] y hasta más de un 25 % la antena de [Cibin et al., 2004] y aunque no es en [Tronquo et al., 2006] donde los FBW llegan a ser más altos sí es donde más se aproximan al límite de Chu, hasta casi la mitad de su valor, mostrando así que la antena de [Tronquo et al., 2006] está mejor aprovechada en cuanto a ancho de banda se refiere.

En cuanto a la directividad alcanzada por las antenas de la bibliografía se puede establecer un rango que va desde los 8dBi [Tronquo et al., 2006] hasta los 12dBi [Klemm et al., 2004]. En este caso también utilizaremos un patrón común para comparar algunas de las directividades dadas en los artículos, este patrón se describe en [Kildal y Best, 2008] y limita la directividad basándose en el diámetro de la esfera en la cual se circunscribiría la antena en cuestión. En el caso de [Locher et al., 2006] la directividad alcanza un valor más o menos deseable, 9dBi, ya que su ganancia es de 4.4dB y su eficiencia de 0.347, pero según el límite de directividad establecido en [Kildal y Best, 2008] este valor se queda muy por debajo del que hubiera podido alcanzar la antena descrita, es decir, alrededor de los 25 dBi. Sin embargo tanto en [Klemm et al., 2004] como en [Hertleer et al., 2007] los valores obtenidos se acercan considerablemente a los establecidos en el límite, concretamente para el caso de [Klemm et al., 2004] el límite se fija en 12 dBi y hay zonas en las que llega a alcanzar este valor, para el caso de [Hertleer et al., 2007] el límite se fija en el mismo valor y su valor real llega hasta los 11.1dBi, ni siquiera 1 dBi de diferencia con el límite, lo cual nos indica que la antena está funcionando eficientemente.

1.6. Condiciones a las que someter a una antena textil.

Como último aspecto de este recorrido a través de lo estudiado en el campo de las antenas textiles se tratarán las distintas condiciones a las que someter a una antena textil para predecir su comportamiento una vez adheridas a las prendas de vestir. Debido precisamente a su flexibilidad y maleabilidad estas antenas sufrirán una serie de deformaciones

que presumiblemente afectarán al modo de funcionamiento de la antena. Un par de deformaciones que se plantean son el curvarla en un determinado radio que simula la curvatura de un brazo o una pierna y el arrugarla a diferentes niveles por ser éstas las principales distorsiones que sufrirán cuando se adhieran a una prenda. Bajo estos efectos, en la bibliografía [Hertleer et al., 2007], [Tronquo et al., 2006],[Bai y Langley, 2009b] y [Bai y Langley, 2009a], se demuestra que suele disminuir la ganancia y al ancho de banda, suele incrementar el ancho de haz y además se producen cambios en la impedancia y la frecuencia central.

Otra condición indudable es la presencia del cuerpo humano que inexorablemente cambia el diagrama de radiación y el funcionamiento en general de la antena, se trata este aspecto en [Hertleer et al., 2007] y [Sanz-Izquierdo et al., 2006]. Se puede someter la antena también a variaciones en los patrones de fabricación de los tejidos como se observa en [Ouyang et al., 2005].

Otras posibles condiciones ya no derivadas de su condición textil son someter a la antena a una desadaptación de polarización entre el transmisor y el receptor, variar el tipo de alimentación, u observar la dependencia de los parámetros de la antena con el tamaño de sus componentes ([Sanz-Izquierdo et al., 2006]y [Floc'h et al., 2009]).

CAPÍTULO 2

ESTUDIO Y ELECCIÓN DE LOS MATERIALES

En este segundo capítulo se ahondará un poco más en lo que a materiales concierne, de lo cual ya se hizo referencia brevemente en el apartado 1.3. Lo que se pretende con este segundo capítulo es entender cuales son las necesidades en cuanto a materiales cuando tratamos con una antena textil. Finalmente se decidirá cuales serán los materiales usados para este proyecto y el por qué de su elección.

2.1. Estudio de los materiales para construir una antena textil

Se necesitan al menos dos tipos de materiales para construir una antena textil. Asumiendo que se trata de una antena de parche se precisará un material conductor para el plano de masa y los parches de la antena; y un material no conductor que actúe a modo de dieléctrico. Como ya se especificó anteriormente en la sección 1.3 de este proyecto, a los materiales textiles, que a su vez son conductores, se les denomina *electrotextiles*. Para poder escoger un material electrotextil u otro es útil saber cuáles son las características demandadas para la construcción de la antena. De la aplicación textil se deduce que debe ser un material que permita ser arrugado y deformado en varias direcciones al mismo tiempo sin que ello afecte a su comportamiento, al menos no en gran medida. Es obvio que debemos descartar por ello materiales como láminas de cobre rígidas, que aunque gozan de una conductividad muy alta no se pueden ni doblar, ni arrugar. Además de materiales rígidos también por esta razón debemos descartar materiales como las poli-amidas que aunque flexibles, si dobladas en varias direcciones, pierden sus características

conductoras originales. Asimismo, además de que permita ser doblado y deformado se necesita que estos materiales regresen a su estado de reposo en el menor tiempo posible manteniendo así una homogeneidad mecánica. También se necesita que su resistencia laminar no sea muy elevada para mantener así las pérdidas de conducción en un nivel mínimo, un valor adecuado será menor que $1\Omega/sq$. Por otro lado necesitamos que la conductividad sea homogénea, o al menos con una varianza muy pequeña, en todo el material para poder predecir su comportamiento y por último que sea resistente al nivel de humedad, dado que si la antena se sitúa en una prenda de ropa es susceptible de ser lavada. Junto con todas las características anteriores también se necesita que todo esto se cumpla en el rango de frecuencias para el cual queremos diseñar nuestra antena.

Con estos requisitos uno podría pensar en la combinación de las características de las fibras flexibles junto con un baño en un material conductor. Esta opción se considera en [Locher et al., 2006], [Massey, 2001] y [Ouyang et al., 2005] y funciona adecuadamente, tan solo destacan en [Locher et al., 2006] el peligro de bañar un material en un conductor y es que si se hace después de tejer las fibras hay partes de dichas fibras que no están bañadas en el material conductor y esto obliga a que la corriente superficial deba saltar de unas fibras a otras en lugar de ser todo el tejido un material conductor, este hecho se describe gráficamente en la figura 2.1. Para el caso en el que las fibras son bañadas antes de ser tejidas los resultados, presentados en [Locher et al., 2006], [Massey, 2001] y [Ouyang et al., 2005], fueron buenos obteniendo una resistencia laminar de hasta $0,02\Omega/sq$ para el caso de un tejido de fibras bañadas en cobre, níquel y plata.

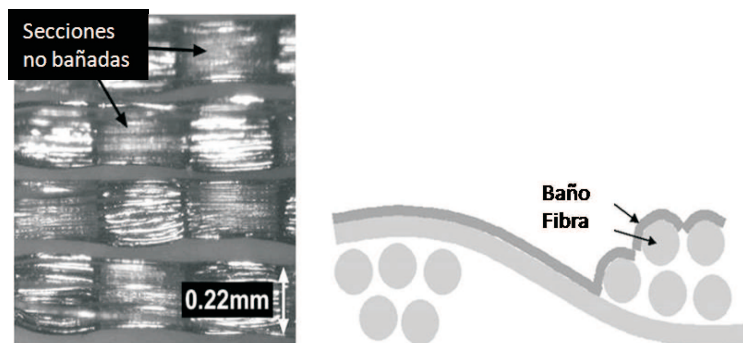


Figura 2.1. Resultados del baño de metal de materiales.

Siguiendo con la idea de tejer hilos en [Ouyang et al., 2005] se contempla la posibilidad de construir un tejido entretejiendo delgados hilos conductores de cobre bañados en plata junto con fibras de Cordura® no conductoras. Además compara dos maneras de tejer dichos hilos, como se muestra en la figura 2.2, haciendo que en uno de los dos lados haya más presencia de material conductor que en el otro.

Los resultados de este tejido fueron buenos pero con el claro inconveniente del previo

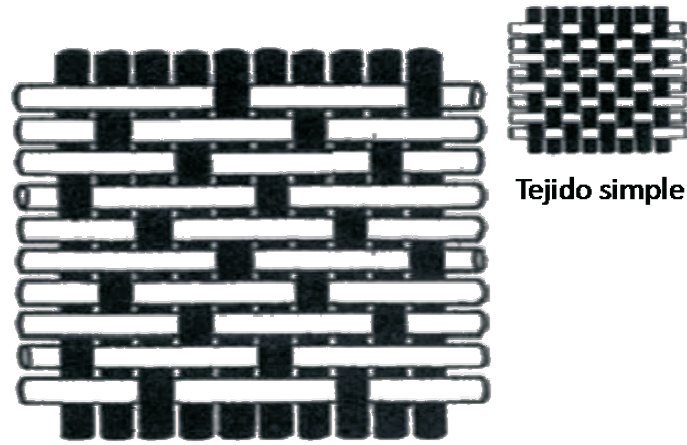


Figura 2.2. Tipos de entretejidos.

tejido a realizar con sus intrínsecas variaciones en los puntos de dicho tejido.

En [Hertleer et al., 2007], [Kennedy et al., 2009], [Bai y Langley, 2009a] y [Bai y Langley, 2009b] se contempla la posibilidad de utilizar tejidos industriales como Flectron[®], Shieldit[®], Nora[®] o Zelt[®], e incluso utilizar uno u otro según de qué parte de la antena se trate. Las características de cada material se resumieron ya en la tabla 1.1 de la sección 1.3.

Si se tratara de una antena de parche, sería interesante utilizar Shieldit[®] para el parche y que así la unión entre éste y el sustrato fuera más sencilla debido a la capa de adhesivo que lleva el material, además su precio es bastante razonable. Podríamos utilizar éste mismo material para la alimentación si esta fuera una línea microstrip o bien utilizar Flectron[®] debido a que puede ser soldado, aunque su precio, en comparación con Shieldit[®], se triplica.

Entre la opción de utilizar materiales tejidos y bañados en material conductor, o los materiales industriales nombrados anteriormente la elección puede que se decante hacia el lado de los materiales industriales porque su precio no es desorbitado y no necesitamos ni tejer ni luego extraer características del tejido.

Una vez elegido el material conductor debe prestarse atención a aquel que actuará como dieléctrico. Las características que en éste se requieren son un ancho constante de unos pocos milímetros y permitividad baja y estable. Baja, porque permite mejorar las características radiantes, y estable en frecuencia para asegurarnos un comportamiento constante en la banda de trabajo. En este caso se pueden utilizar materiales más convencionales como el vellón [Hertleer et al., 2007], o el fieltro ([Hertleer et al., 2007], [Bai y Langley, 2009a], [Bai y Langley, 2009b], [Locher et al., 2006] y [Salonen et al., 2005]), telas 100 % poliéster o materiales industriales como Nomex [Kennedy et al., 2009] o Vecro [Bai y Langley, 2009a] y

[Bai y Langley, 2009b].

En este caso, entre el vellón y el fieltro se preferirá el fieltro porque su permitividad es mayor al igual que su densidad. Por otro lado la elección entre el fieltro o algún material industrial se inclinará por el fieltro ya que es fácil de conseguir, con la flexibilidad exigida a un material textil y además es barato (20 €/metro aproximadamente). El inconveniente de elegir el fieltro es que mediante las técnicas explicadas en [Grzyb et al., 2003] debemos extraer el valor de la permitividad del material antes de comenzar el proceso de diseño.

2.2. Elección de los materiales para diseñar una antena textil

Una vez realizado el análisis de los materiales se procederá a justificar cuál ha sido la elección que se ha tomado para el diseño de la antena. El material dieléctrico que se ha escogido para el diseño se denomina NOMEX[®], es un material absorbente desarrollado por la compañía DuPont y se presenta en varios tamaños con diferentes propiedades eléctricas lo que da versatilidad a la hora de diseñar y posibilidad de corrección ante fluctuaciones del comportamiento final del prototipo. El grosor escogido para dicho material es de 3mm y la constante dieléctrica del mismo es 3. Por otro lado, el material electrot Textil que se decidió escoger Shieldit[®], mencionado anteriormente, por sus alta conductividad y su fácil fabricabilidad por constar de adhesivo. Además, se utilizará también hilo de cobre para relizar uniones y cortocircuitos.

CAPÍTULO 3

SUPERFICIES SOFT Y HARD

En este tercer capítulo se comenzará por hacer un breve estudio de qué son y cómo funcionan la *superficies Soft y Hard* y se acompañará con una serie de simulaciones que demuestran su funcionamiento y justifican su aplicación en este trabajo.

3.1. Breve estudio de las superficies Soft y Hard

Los conceptos de superficie *Soft* y superficie *Hard* se introdujeron en el ámbito de las antenas allá por el año 1988 [Kildal, 1988]. Venían existiendo desde hacía ya un tiempo en la teoría de acústica y por analogía que se tomaron los mismos nombres para designar a este tipo superficies aplicadas al campo de las microondas. En acústica la característica que define a una superficie *Hard* es que la densidad de flujo de potencia goza de un máximo a lo largo de dicha superficie, así que ocurrirá lo mismo para la definición que a ondas electromagnéticas se refiere. Por otro lado la característica que define a una superficie *Soft* es que la densidad de flujo de potencia a lo largo de dicha superficie es cero y de nuevo se mantiene la equivalencia con su análoga en el terreno de las antenas. La descripción física de este fenómeno debe comenzarse por considerar la propagación de ondas a lo largo de una superficie reactiva y anisótropa. Para hacer esto se puede considerar como modelo de superficie una rejilla de tiras PEC (Perfect Electric Conductor) y PMC (Perfect Magnetic Conductor) dispuestas paralela e intercaladamente, o bien, una superficie corrugada encajada en un dieléctrico puesto a masa. Será entonces una superficie *Soft* si tomamos la orientación transversal con respecto a

la dirección de propagación de la onda y se tratará de una superficie *Hard* si nos fijamos en la orientación longitudinal de nuevo con respecto a la dirección de propagación de la onda.

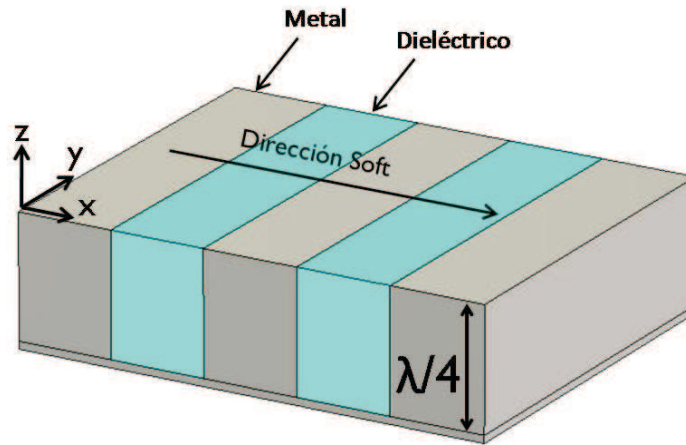


Figura 3.1. Modelo de superficie.

A continuación se tomará como sistema de referencia el representado en la figura 3.1 donde se distinguen dos direcciones tangentes a la superficie, la dirección longitudinal que coincide con el eje de abscisas y la dirección transversal que se corresponde con el eje de ordenadas en esta misma figura. Una vez hemos precisado estas direcciones podemos definir las impedancias de superficie para ambas, éstas son $Z_l = -E_x/H_y$ para el caso de la impedancia longitudinal y $Z_t = E_y/H_x$ para la impedancia transversal, donde E_x y H_x son las componentes longitudinales del campo eléctrico y magnético respectivamente y E_y y H_y son las componentes transversales del campo eléctrico y magnético. Con las impedancias definidas una superficie *Soft* será aquella para la cual se tiene que

$$\begin{aligned} Z_t &= 0 \\ Z_l &\rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Por lo tanto la dirección *Soft* se corresponde con la dirección transversal a la rejilla. En el plano de masa, o valle de la corrugación, la impedancia es nula o lo que es lo mismo, se tiene una condición de cortocircuito así que, siempre que la altura de las tiras sea $h = \lambda/4$, donde λ es la longitud de onda en el dieléctrico, se obliga a que la condición de cortocircuito del valle se convierta en la parte superior en una condición de circuito abierto a la frecuencia central de funcionamiento definida como $f = c/\lambda = c \cdot \sqrt{\epsilon}/\lambda_0$, siendo ϵ la constante dieléctrica. Por lo tanto, la impedancia de superficie tiende a infinito y por ello cancela las ondas de superficie que la atraviesan. Si se presta atención

al tipo de superficies *Hard* se puede deducir que la condición es complementaria al caso de las superficies *Soft* ya que el campo se propaga ahora en la dirección longitudinal y no en la transversal por lo que tenemos

$$Z_l = 0$$

$$Z_t \rightarrow \infty.$$

Esto ocurre por las mismas razones que se explicaron anteriormente en el caso de la superficie *Soft* [Pablo, 2009].

Podría parecer una limitación el hecho de que este tipo de superficies tan solo actúe como se les requiere en una determinada dirección. Sin embargo, para la aplicación en este proyecto no limitará el funcionamiento de la antena. Esto es debido a que en una antena siempre tendremos localizada una fuente ya sea una sonda, un dipolo o una ranura por lo que siempre se sabrá de antemano la dirección de propagación de la onda. Sabiendo esto se podrán orientar las tiras que conforman la superficie de la manera conveniente para la aplicación deseada [Rajo-Iglesias et al., 2007].

La realización de estas superficies comenzó por hacerse mediante el uso de tiras de metal sobre una superficie de tierra de igual manera que se describió en el modelo de la figura 3.1. Posteriormente se propuso una versión horizontal de estas corrugaciones que consisten en unas tiras tan anchas como altas eran las corrugaciones en el caso inicial de las superficies *Soft*, colocadas a una determinada distancia sobre un dieléctrico puesto a masa y cortocircuitadas por medio de unas paredes metálicas conectadas a lo largo del plano de masa (ver la figura 3.2 [Rajo-Iglesias et al., 2009b]). Esta modificación supone una superficie basada en el mismo fenómeno físico, por lo que se pueden tomar los mismos parámetros del análisis funcional, pero además se consigue un perfil mucho menor, junto con una reducción de la altura del sustrato de varias fracciones de la longitud de onda lo que permite la realización de superficies mucho más estrechas y adaptables. Posteriormente los autores Kildal y Kishk, propusieron sustituir las paredes metálicas que cortocircuitaban las tiras de metal con el plano de masa por agujeros a través de las mismas para que se comportaran como corrugaciones horizontales cuya implementación se inspiró en las superficies de tipo EBG (Electromagnetic Band Gap), referidos a menudo como “seta” o “mushrooms” [Rajo-Iglesias et al., 2007]., dicha modificación permitía, ahora sí, una arquitectura planar fabricable.

Debido a la condición de anisotropía de estas superficies dentro de la banda de frecuencias en las que efectivamente actúa como superficie *Soft* o *Hard*, se comportan de manera diferente para ambas polarizaciones designadas como horizontal y vertical con respecto a la superficie. En concreto para la polarización vertical se comportan como



Figura 3.2. Equivalencia entre corrugaciones verticales y horizontales.

un PMC mientras que para la polarización horizontal se comportan como un PEC; es por esto que cancelan ambas polarizaciones al mismo tiempo para todos los ángulos de incidencia sobre la superficie de la antena [Rajo-Iglesias et al., 2009a]. De esto se deduce que las superficies *Soft* y *Hard* gozan de condiciones de polarización independientes de las condiciones de contorno (a la frecuencia central) en contraste con un conductor metálico que tiene diferentes condiciones de contorno dependiendo si se trata de la componente normal o la componente tangencial del campo eléctrico [Kildal, 1993]. Este fenómeno aparece como una de las principales ventajas de las *superficies Soft/Hard* frente a las EBG que son capaces de rechazar el campo electromagnético en todas las direcciones, pero sólo para una polarización. Por lo tanto, debido a su bajo tamaño y coste se prefieren las corrugaciones horizontales en lugar de las EBG; y entre las corrugaciones horizontales con paredes metálicas o con vías se ha decidido utilizar la versión con vías ya que permite un tuneado de frecuencia considerable gracias a la periodicidad de las vías y a una reducción en lo que a tamaño se refiere.

Entre las aplicaciones más populares de este tipo de superficies se encuentran las conocidas como bocinas corrugadas cuya finalidad es conseguir diagramas más simétricos con un ancho de haz igual en los planos E y H, y obtener niveles de polarización cruzada más bajos y elevadas eficiencias del haz [Kildal, 1993]. Este tipo de superficies se pueden utilizar también para reducir el acoplamiento mutuo entre dos o más antenas polarizadas arbitrariamente y colocadas en el mismo plano de masa [Rajo-Iglesias et al., 2009a]. En este trabajo se hará uso de una superficie *Soft* en tecnología microstrip para reducir la radiación trasera de una antena de parche, eliminando o reduciendo dicha radiación para todos los ángulos de incidencia y sin incrementar en gran medida el coste y desarrollo final de la antena.

3.2. Estudio y caracterización de superficies soft en tecnología microstrip

Para comprobar el funcionamiento de la superficie *Soft* que se va a utilizar en el modelo final de la antena se han realizado una serie de simulaciones con el simulador CST Microwave Studio. Para ello se ha utilizado una estructura finita compuesta de un plano de masa cubierto con un material dieléctrico y a su vez sobre éste un número finito

de periodos de superficie *Soft*. Una vez creada la estructura se estudió el parámetro correspondiente a la dirección *Soft* y se analizaron sus propiedad filtrantes mediante la colocación de dos puertos “waveguide” a ambos lados de la estructura tal y como se indica en la figura 3.3.

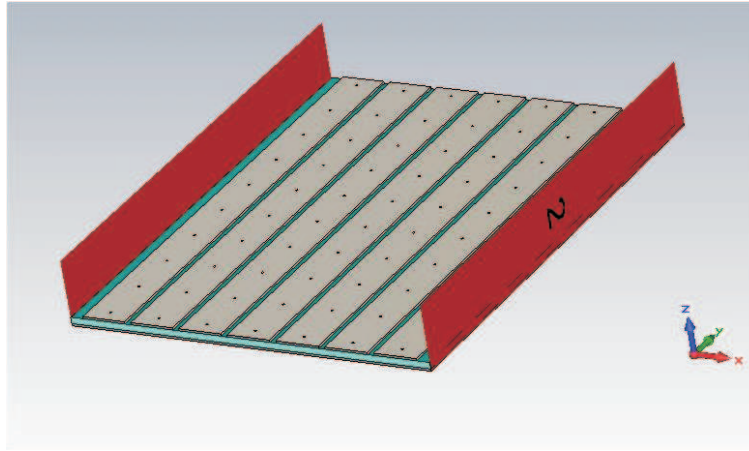


Figura 3.3. Colocación de los puertos Waveguide.

Debido a las diferentes morfologías de las antenas de parche aquí se estudian dos posibles configuraciones de superficie *Soft*. La primera de ellas es una estructura con forma rectangular que se colocaría a ambos lados del parche tal y como se muestra en la figura 3.3 para el caso de un parche rectangular. En cuanto a la segunda, se trata de una superficie *Soft* en forma de anillos concéntricos que se dispondrían rodeando al parche; se puede observar una imagen de este tipo de superficie en la figura 3.4.

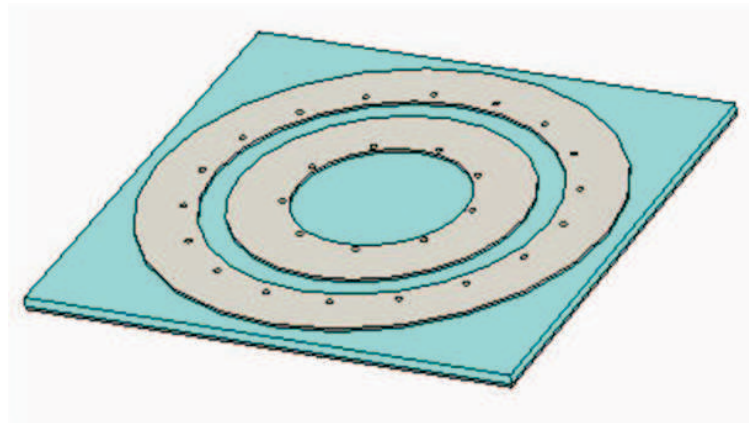


Figura 3.4. Superficie *Soft* Circular.

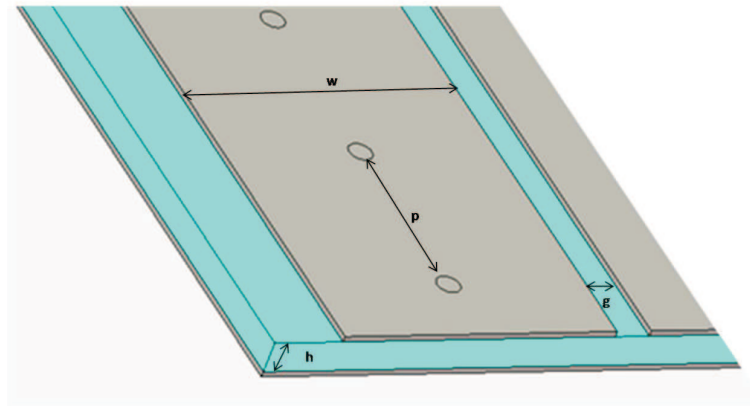
3.2.1. Estructura Rectangular

Comencemos por estudiar las superficies *Soft* de tipo rectangular como la que se muestra en la figura 3.3. En este tipo de estructuras existen una serie de parámetros que se

Cuadro 3.1. Tabla de Parámetros.

Parámetro	Descripción
w	Ancho de cada una de las tiras que cubren el dieléctrico
p	Periodicidad de las vías a lo largo de las tiras
h	Altura del dieléctrico
$vias_{pos}$	Posición horizontal de las vías (derecha, izquierda o centro)
N	Número de tiras o periodos
g	Separación entre tiras

pueden variar para conseguir las características deseadas, principalmente la frecuencia de funcionamiento ¹, el nivel de filtrado y el ancho de banda de trabajo. Estos parámetros variables se especifican en la tabla 3.1 y se pueden observar gráficamente en la figura 3.5.

**Figura 3.5.** Parámetros de una superficie *Soft* rectangular.

Aquellos parámetros que ayudarán a conseguir la frecuencia de trabajo deseada son: w , p , h y $vias_{pos}$. La dependencia de estos parámetros sobre la frecuencia de funcionamiento se mostrará a continuación en función de simulaciones obtenidas con CST Microwave Studio.

Para proceder a analizar la influencia de cada uno de los parámetros se ha tomado una estructura de referencia en la que se mantendrán el resto de parámetros fijos tal y como se indica en el cuadro 3.2.

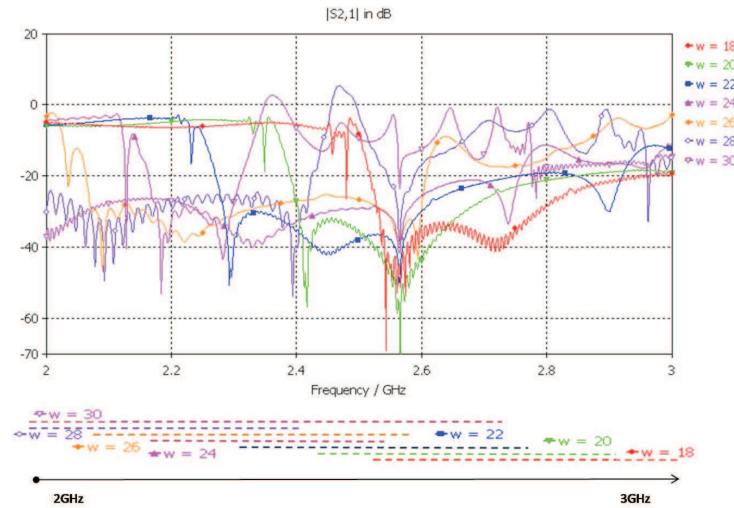
Se ha comenzado por hacer variar el parámetro w que se corresponde con la anchura de las tiras. Como puede observarse en la figura 3.6 al aumentar dicho valor hacemos que la frecuencia disminuya; por el contrario si disminuimos w conseguimos que aumente la

¹Se entiende por frecuencia de funcionamiento aquella en la cual se desea que la radiación trasera sea reducida

Cuadro 3.2. Tabla de Parámetros.

Parámetro	Valor (mm)
w	24
p	16
h	3
$vias_{pos}$	centro ($d=0$)
N	6
g	3

frecuencia en la que ocurre la banda frecuencial de interés. Para una mejor interpretación de los resultados en la parte inferior de la gráfica se ha hecho referencia únicamente a la banda eliminada para cada valor de w , y no a su nivel de filtrado, manteniendo el mismo código de colores de la gráfica original y así poder observar los resultados de una manera más clara. Por último, y también a modo de ayuda visual, se ha plasmado la relación entre w y la frecuencia inicial para la cual el parámetro $|S_{21}|$ es inferior a -20dB por un periodo constante a lo largo de la frecuencia en la figura 3.7. En esta figura se demuestra que la relación entre frecuencia y anchura de las tiras es inversamente proporcional. Esta dependencia se debe a que la anchura de las tiras define la frecuencia de funcionamiento, pues establece la frecuencia de operación de AMC (Artificial Magnetic Conductor) para un caso de tecnología microstrip ($h = \lambda/4$).

**Figura 3.6.** Efecto de la variación de w (en mm). Parámetro $|S_{21}|$ en función de la frecuencia.

Este mismo proceso se ha realizado variando el parámetro p que hace referencia a la periodicidad de las vías a lo largo de las tiras. La simulación de este caso se observa

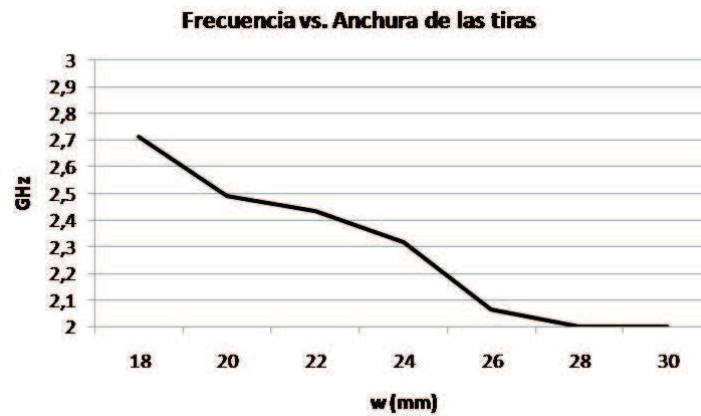


Figura 3.7. Relación entre la frecuencia de trabajo y w en (mm).

en la figura 3.8 y al igual que en la figura 3.6, en la parte inferior se ha intentado mostrar de una manera visual más sencilla, destacando sólo el movimiento de la banda de interés a lo largo del eje de frecuencias. De ambas figuras se deduce que al aumentar la periodicidad disminuimos la frecuencia, por lo tanto la relación entre ambas es de proporcionalidad inversa. Esta relación se observa claramente en la figura 3.9 dónde se ha tomado como valor de la frecuencia el inicio de la banda para la cual el parámetro S_{21} se mantiene por debajo de -20dB por un periodo constante.

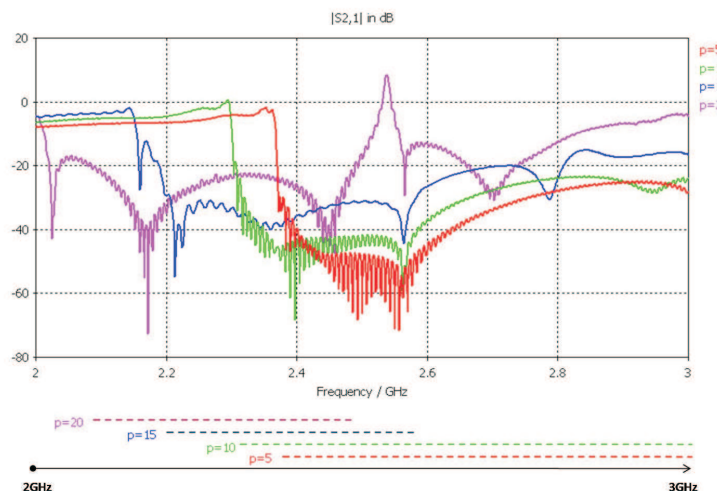


Figura 3.8. Efecto de la variación de p (en mm). Parámetro $|S_{21}|$ en función de la frecuencia.

De igual manera que los casos de w y p se ha variado la altura del substrato manteniendo fijos el resto de parámetros. Los resultados de este proceso se observan en la figura 3.10 de dónde se deduce que a medida que disminuimos la altura del substrato aumenta la frecuencia y viceversa, si aumentamos la altura conseguiremos disminuir la

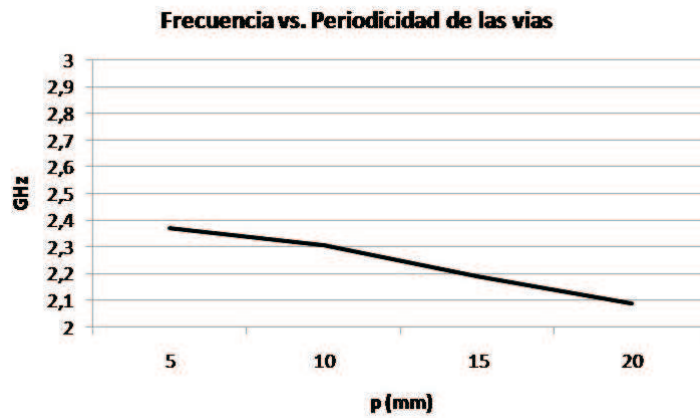


Figura 3.9. Relación entre la frecuencia de trabajo y p (en mm).

frecuencia. Repetidamente nos encontramos ante una relación inversamente proporcional que se observa claramente en la figura 3.11 donde, al igual que en los dos casos anteriores, se ha considerado como inicio de la banda de interés aquel dónde el parámetro S_{21} se sitúa por debajo de los -20dB. Este efecto se debe a la modificación de la frecuencia de funcionamiento de la superficie AMC.

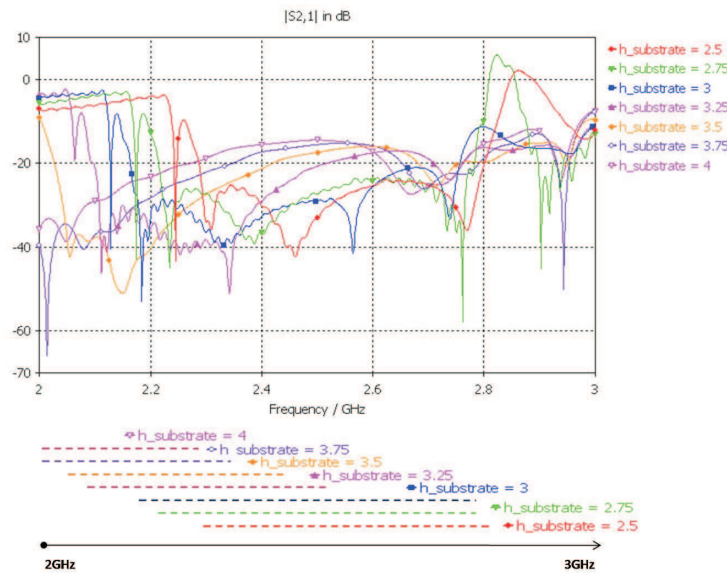


Figura 3.10. Efecto de la variación de $h_{\text{substrate}}$ (en mm). Parámetro $|S_{21}|$ en función de la frecuencia.

Por último se ha variado la posición de las vías que atraviesan las tiras en la dimensión más corta de éstas. El parámetro S_{21} para dicha variación se observa en la figura 3.12, dónde se puede apreciar que en cualquiera de las dos direcciones provocará una disminución de la frecuencia. Para el caso de la figura 3.12, las vías se han movido la

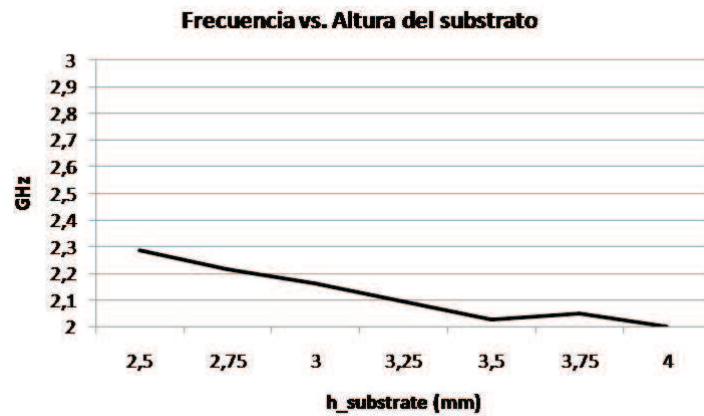


Figura 3.11. Relación entre la frecuencia de trabajo y $h_{substrate}$ (en mm).

misma distancia hacia la derecha que hacia la izquierda y es por esto que coincide el comportamiento del parámetro S_{21} , para una misma distancia, en ambas direcciones. Se ha originado una gráfica que relaciona directamente el desplazamiento (d) en milímetros con la frecuencia inicial para la cual el parámetro S_{21} se sitúa por debajo de los -20dB; esta gráfica se observa en la figura 3.13 y se aprecia una respuesta triangular a las perturbaciones de la posición de las vías.

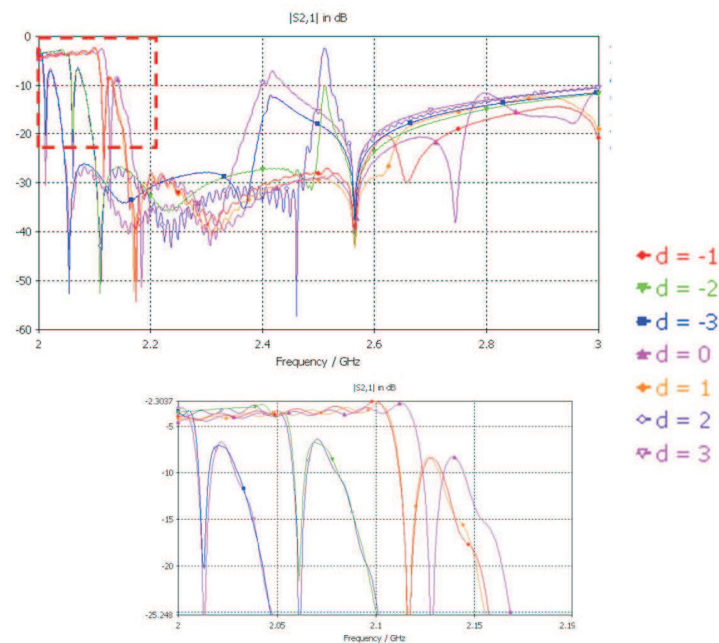


Figura 3.12. Efecto de la variación de la posición de las vías d (en mm). Parámetro $|S_{21}|$ en función de la frecuencia.

No menos importante que la frecuencia de trabajo es el nivel de filtrado ya que

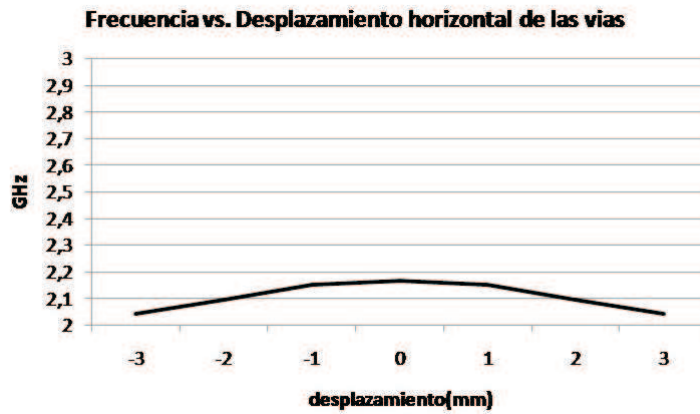


Figura 3.13. Relación entre la frecuencia de trabajo y la posición de las vías d (en mm).

dependiendo de la aplicación necesitaremos un nivel más o menos acentuado a costa de otros aspectos como pueden ser el tamaño total de la superficie. Un factor que influye directamente en el nivel de filtrado es la cantidad de tiras que se utilicen para conformar la superficie, es decir, a mayor número de tiras mejor nivel de filtrado. Este hecho se puede observar en la figura 3.14 donde se presenta el parámetro S_{21} en función de la frecuencia para diferente número de tiras. Suele ocurrir que llegados a un determinado número el incremento del número de tiras no supone un incremento notable en el nivel de filtrado, esto se puede observar en la figura 3.15, donde se observa que pasar de 6 a 7 tiras no incurre en una gran diferencia en lo que a nivel de filtrado se refiere.

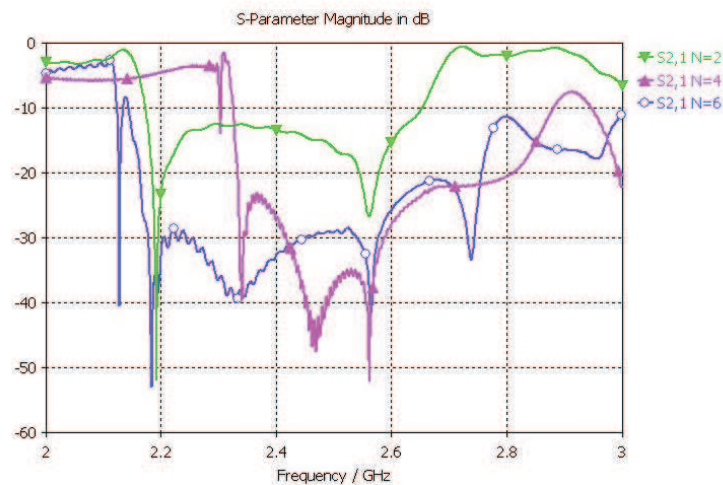


Figura 3.14. Relación entre el nivel de filtrado y el número de tiras (N).

Cabe destacar que la variación de w , p , h y vas_{pos} también hace variar el nivel de filtrado (como se observó en las figuras 3.6,3.8,3.10,??) pero no en la misma medida que

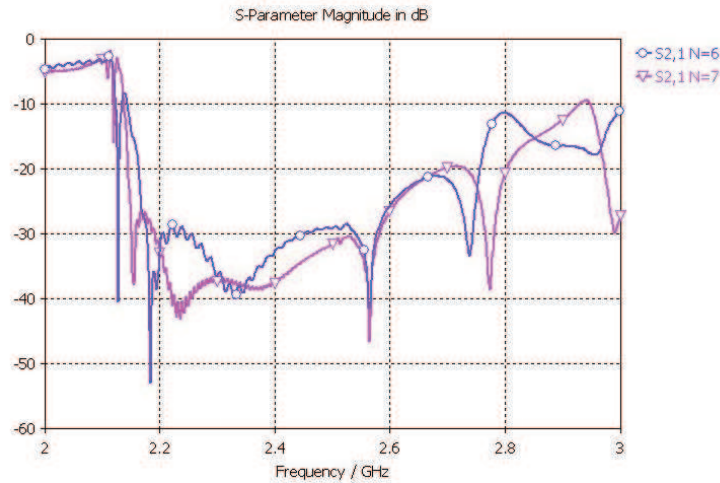


Figura 3.15. Relación entre el nivel de filtrado y el aumento de 6 a 7 tiras.

lo consigue el aumentar en el número de periodos de superficie *Soft*. Es por ello que no se utilizan estos parámetros para este propósito, aunque también se podría jugar con ellos para variar en unos cuantos decibelios el nivel de filtrado. Además, es posible que para una determinada frecuencia tan solo podamos variar el parámetro N para conseguir mayor nivel de filtrado ya que variar cualquiera de los otros parámetros implicará un desplazamiento no deseado en frecuencia.

Por último no debemos olvidar el ancho de banda de trabajo, característica que se controlará sobretodo con la variación del número de tiras y en menor medida con la separación entre ellas. Si comparamos las figuras 3.16 y 3.17 en las que se ha relacionado el ancho de banda ² con N y g , con las figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 en las que se relaciona el ancho de banda con w , p y las posición de las vías, se puede apreciar como para las dos primeras la variación de ancho de banda supera los 600 MHz del valor más bajo al más alto mientras que en caso de las tres últimas las variaciones no superan los 200 MHz. De éstas gráficas se deduce que la relación es directamente proporcional, tanto con g como con N , con lo cual un aumento de cada uno de estos parámetros conseguirá un acrecimiento del ancho de banda de filtrado. Cabe destacar que llegará un determinado valor de N para el cual el aumento del ancho de banda sea prácticamente inapreciable, de igual manera que ocurrirá para g , de hecho se observa en la figura 3.17 como a partir de $g=2$ el ancho de banda parece estabilizarse.

La combinación correcta de todos estos parámetros dará lugar a una superficie *Soft* capaz de reducir la radiación trasera del parche que rodee. Para comprobar este fenó-

²En este caso para el ancho de banda se consideran las frecuencias para las cuales el parámetro S_{21} se sitúa por debajo de los -20dB por considerarse este un valor suficiente para disminuir la radiación trasera de una antena de parche.

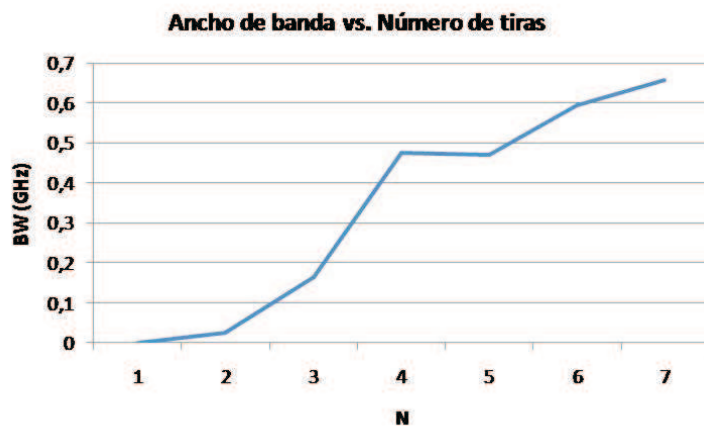


Figura 3.16. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y N (número de tiras).

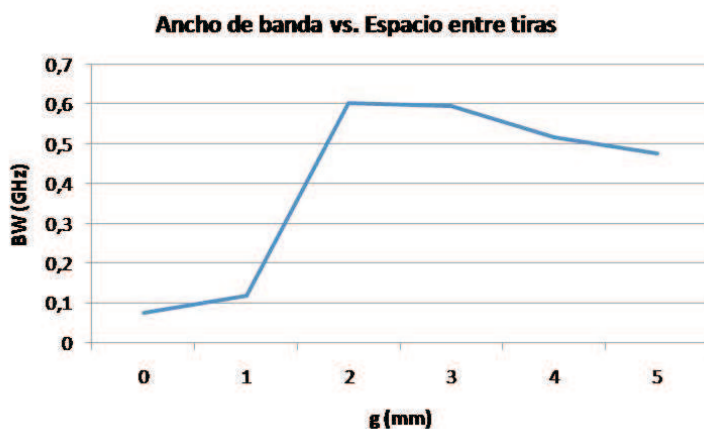


Figura 3.17. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y g (mm).

meno, se ha realizado una simulación que esclarece la aplicación de las superficies *Soft* en este proyecto, dicho ejemplo es el capítulo 5 del presente proyecto.

3.2.2. Estructura Circular

A continuación realizaremos el mismo análisis cometido para el caso de la estructura *Soft* con forma rectangular pero para el caso circular. Como se puede observar en la figura 3.4 la estructura que a continuación estudiaremos se compone de una serie de anillos concéntricos atravesados en disposición circular por unas vías que alcanzan el plano de masa situado justo debajo del sustrato. De nuevo aquí, al igual que en el caso de la estructura rectangular de la sección 3.2.1, también existen una serie de parámetros que podemos variar para conseguir los objetivos que la superficie *Soft* nos requiera.

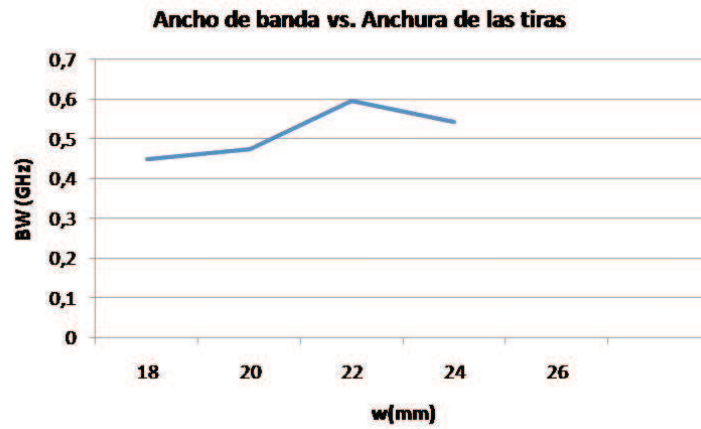


Figura 3.18. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y w (mm).

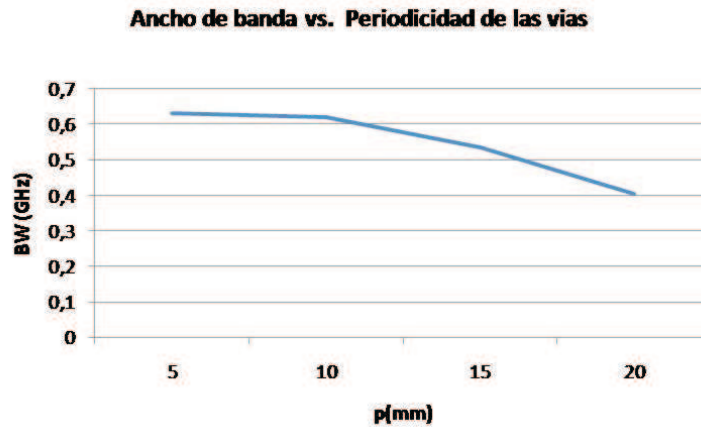


Figura 3.19. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y p (mm).

En este caso los parámetros que se pueden variar se especifican en el cuadro 3.3 y se muestran gráficamente en la figura 3.22.

Los únicos dos parámetros que resultan distintos con respecto al caso rectangular son $p1$ y $p2$. Entre ambos valores existe una relación directa que se explica con más detalle en el apéndice A, donde se demuestra que los valores que se tomen para $p1$ no pueden ser independientes de los que se tomen para $p2$. En este caso se fija uno de ellos, concretamente $p1$, ya que este parámetro indica la periodicidad de las vías que será lo que de manera más dominante fije la frecuencia de funcionamiento de la superficie *Soft*. El hecho de dar varios valores a $p1$ nos obliga a variar $p2$ de manera que por cada variación se aumenta o disminuye respectivamente el número de vías a lo largo de las tiras para que así cubran todo el radio de los anillos que forman la superficie *Soft*. Para este caso se

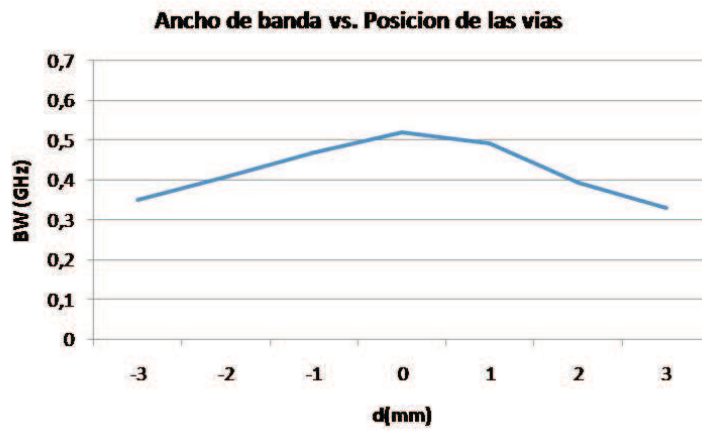


Figura 3.20. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y la posición de las vías (mm).

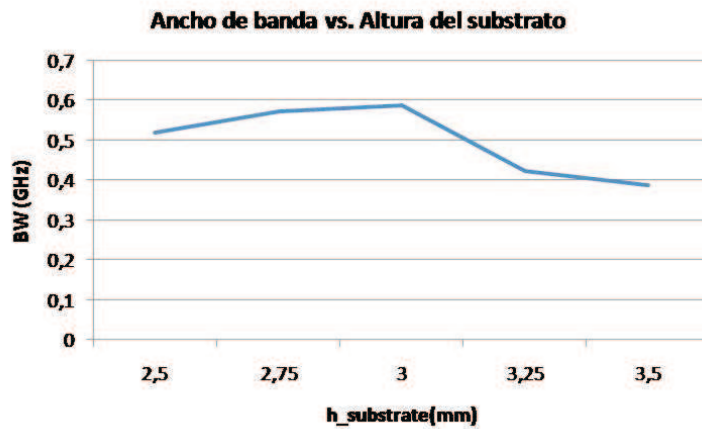


Figura 3.21. Relación entre el ancho de banda (por debajo de -20dB) y $h_{\text{substrate}}$.

ha procedido a realizar el estudio igual al de la sección anterior 3.2.1. Esto es así porque con la disposición circular de la superficie se consigue la suma de las contribuciones en cada una de las direcciones perpendiculares a las tangentes del parche. Es decir, es una situación equivalente a la rectangular, ya que es como si las ondas de superficie vieran una estructura *Soft* con forma rectangular en cada una de las direcciones que parten del centro del parche; así se podría estudiar de igual forma. Debido a que el estudio para el caso circular es equivalente al caso rectangular no se repetirán en esta sección los resultados ya que la respuesta a las variaciones realizadas en la sección anterior será la misma para este caso. Tan solo reflejaremos qué ocurre ante las variaciones de los dos parámetros que resultan distintos respecto al caso de la superficie *Soft* rectangular: $p1$ y $p2$. Dichos resultados se muestran en la figura 3.23 donde se aprecia que ante

Cuadro 3.3. Tabla de Parámetros.

Parámetro	Descripción
w	Ancho de cada una de las tiras que cubren el dieléctrico
h	Altura del dieléctrico
$p1$	Periodicidad de las vías a lo largo de las tiras
$p2$	Periodicidad concéntrica de las vías
N	Número de tiras o periodos
g	Separación entre tiras

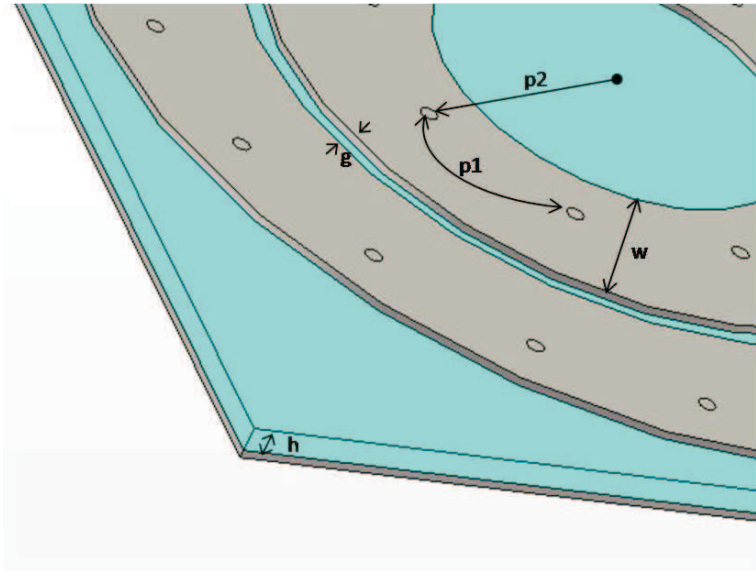


Figura 3.22. Parámetros de una superficie *Soft* circular.

un aumento de la periodicidad de las vías la frecuencia de funcionamiento responde desplazándose hacia la izquierda en el eje de frecuencias, es decir, a mayor periodicidad, menor frecuencia de funcionamiento. Se puede apreciar también cómo no existe solamente una frecuencia de funcionamiento sino que se distinguen claramente tres picos, uno de estos tres picos, concretamente aquel en el que los tres casos coinciden se deben a la frecuencia de resonancia de la propia estructura, por otro lado, los dos restantes sí se deben a la superficie *Soft*, y son dos ya que cada tira está funcionando a una frecuencia distinta debido a la posición de los cortocircuitos en cada una de ellas. La razón por la cual se ha decidido colocar las vías de las tiras en dos posiciones distintas en cada una de ellas es por la posibilidad de un aumento del ancho de banda o bien por conseguir así dos frecuencias de funcionamiento.

Por lo tanto, para el diseño de una superficie *Soft* circular ,fijando unos valores de frecuencia, nivel de filtrado y ancho de banda como valores objetivos, debemos encontrar la combinación adecuada de los parámetros en la tabla 3.3 que nos proporcionen el

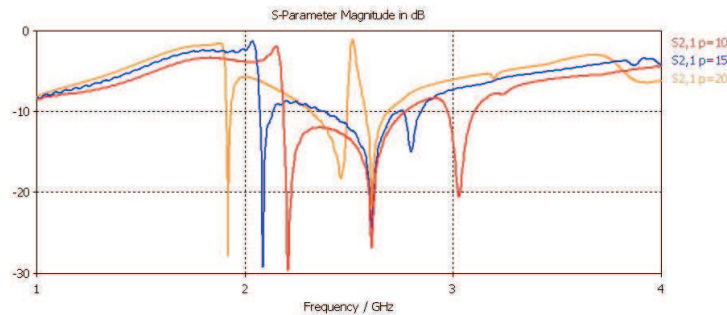


Figura 3.23. Efecto ante la variación de la periodicidad de las vias (p en mm). S_{21} en relación a la frecuencia.

resultado deseado o al menos el resultado más cercano posible.

Una manera de comprobar que se ha obtenido una combinación de parámetros adecuada es realizando un diagrama de dispersión en el que se muestren cuáles son los modos que se están dando y cuales son sus frecuencias de corte. En la figura 3.24 se muestra el diagrama de dispersión de la superficie *Soft* diseñada, en dicha figura se aprecia como a partir de la línea de luz hacia la izquierda no existe propagación posible ya que no existe parte imaginaria de la constante de propagación, sin embargo, de la línea de luz hacia la derecha sí se existe propagación. En esta figura, se muestran los dos primeros modos de propagación con los que se determina cual es el rango de funcionamiento de la superficie soft, en este caso dicho rango comienza alrededor de los 1.8 GHz y llega hasta los 2.8 GHz (rango en el cual no existe ningún modo que se pueda propagar en dicha superficie).

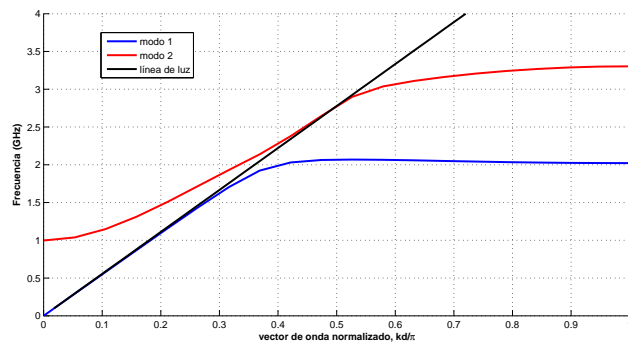


Figura 3.24. Diagrama de dispersión de la superficie *Soft* diseñada.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE LA ANTENA

Como ya se comentó en la sección 1, existe una gran variedad en lo que a tipos de antenas se refiere, pero para el caso que se trata en este trabajo se empleará una antena tipo parche microstrip. En primer lugar, se darán las razones de esta elección, y a continuación se describirá el proceso de diseño de la antena en cuestión y se mostraran las simulaciones realizadas con el programa de simulación CST Microwave Studio para validar correcto funcionamiento del diseño.

4.1. Introducción a las antenas microstrip

Las antenas de microstrip han sido ya estudiadas en profundidad y caracterizadas por diferentes autores. Este tipo de antenas son compactas, tienen un bajo coste de fabricación y presentan una alta eficiencia en su modo fundamental de radiación, prueba de ello es la confianza y seguridad con la que los diseñadores de todo el mundo las usan para una gran variedad de aplicaciones (comunicaciones móviles, antenas en aviones, satélites de comunicaciones, radares, aplicaciones biomédicas, telemetría, observación de la tierra, sistemas de vigilancia, identificación y control, etc.). Se atribuye la invención de este tipo de antenas a varias fuentes pero son a Greig, Englemann y Deschamp a quien se otorga su descubrimiento. En aquellos tiempos, los años 50, se habían dado cuenta de las indeseadas radiaciones que emitían los circuitos de tira (stripline), por ello se decidió reducir tanto la dimensión del substrato, como la del parche conductor y así inhibir los efectos de dicha radiación indeseada; fue así como nacieron las antenas microstrip (microstrip)

[Roderick y Hall, 1989]. A pesar de nacer en los años 50, no fue hasta los años 70 cuando se empezaron a fabricar las primeras antenas microstrip debido a la disponibilidad de buenos substratos, con una tangente de pérdidas baja y unas propiedades térmicas y mecánicas aptas para su desarrollo, acompañado todo ello de unos buenos modelos teóricos que permitían su estudio y perfeccionamiento.

Entre las principales ventajas de las antenas impresas (y en particular de las antenas de parche), se encuentran, como ya se ha mencionado, su bajo perfil que conlleva un reducido peso y volumen. Además son antenas de bajo coste, son versátiles, tanto en frecuencia, polarización o diagramas y compatibles con dispositivos activos y fáciles de agrupar en arrays. Por último, es importante destacar su adaptabilidad a superficies curvas, lo que dicta en gran parte la decisión final del por qué se han escogido este tipo de antenas para una aplicación textil. Claro que no todo son ventajas ya que este tipo de antenas sufren radiaciones espurias, tanto por la línea de alimentación (dependiendo de la misma), como por las ondas de superficie o por los bordes que estropean el comportamiento de la antena. Además de ello son importantes las limitaciones de potencia, aunque en el caso que se trata no supone un impedimento de uso.

La configuración más sencilla de este tipo de antenas consiste en un parche radiador en uno de los lados de un substrato y un plano de masa al otro lado, dicha configuración se puede observar en la figura 4.1. Tanto para el plano de masa como para el parche radiador se utiliza un material metálico, mientras que el substrato está hecho de un material dieléctrico con una constante dieléctrica ϵ_r que puede fluctuar desde 1 hasta valores de 12, aunque son los valores por debajo de 5 los más utilizados para mejorar con ellos las condiciones de la radiación.

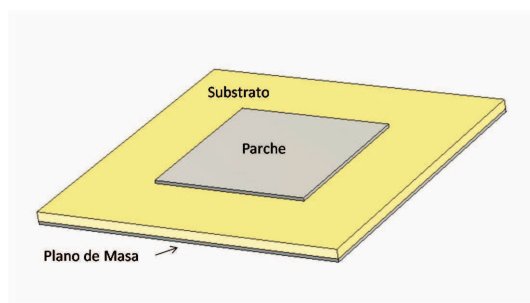


Figura 4.1. Configuración típica de una antena de parche microstrip.

La lámina metálica o parche no tiene por qué necesariamente ser cuadrada, puede disponerse en una gran variedad de formas. Algunas de estas formas se muestran en la figura 4.2, entre las cuales la cuadrada y la circular son las más habituales puesto que su análisis y formulación es canónica, y ha sido ampliamente estudiada.

En cuanto a las dimensiones se debe tener en cuenta que el parche debe ser de tamaño resonante, esto es, que oscile entre $0,25\lambda$ y λ , con un espesor que típicamente es mucho

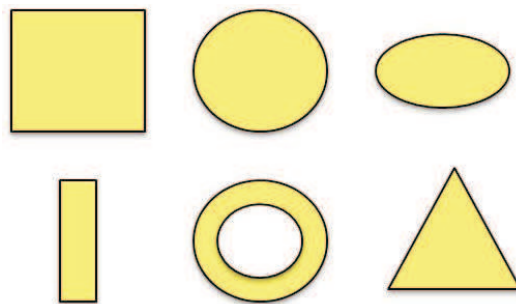


Figura 4.2. Posibles formas del parche de la antena.

menor que λ (típicamente $35 \mu m$). Para cada forma de parche existen expresiones que se acercan teóricamente al valor práctico del tamaño del parche, dada una frecuencia y un valor para la constante dieléctrica y el espesor del sustrato; en el apartado de diseño de esta misma sección 4.2 se incurrirá en un ejemplo. Por otro lado, cuanto mayor es el espesor del sustrato mayor será el ancho de banda y la eficiencia de radiación y cuanto menor sea éste, más disminuirá la radiación de las líneas y menores serán las pérdidas; siendo, por tanto, este espesor del sustrato un parámetro con el que se debe jugar hasta conseguir el valor deseado adquiriendo un compromiso entre las citadas características. Los valores que típicamente se le otorgan se encuentran en el rango de entre $0,005\lambda$ y $0,2\lambda$.

4.2. Diseño de la antena

El objetivo es diseñar un elemento radiante que funcione a la frecuencia central de la banda ISM que va de 2.4 GHz a 2.835 GHz. Se ha escogido esta banda de frecuencia por tratarse de una banda que no necesita licencia y que está destinada a usos industriales, médicos y científicos. Además de dicha frecuencia central de funcionamiento (2.45 GHz) se desea también una adaptación mejor que -10 dB en la banda ISM, y polarización lineal aunque otra polarización podría ser empleada.

En las especificaciones no se ha fijado ninguna forma de parche, así que se ha decidido utilizar una antena de parche circular ya que con este perfil puede conseguirse un tamaño más reducido que en el caso de un parche rectangular y además la forma circular colabora con un menor efecto de bordes por no tener variaciones bruscas en su perfil. Además, se alimentará mediante un coaxial con conector SMA.

Como se comentó en la sección 4.1, existen expresiones que teóricamente indican el tamaño del radio del parche a utilizar. Para ello debe conocerse antes la frecuencia de funcionamiento, en este caso 2.45 GHz, la permitividad del sustrato, que como se especificó en el capítulo 2, será igual a 3 por tratarse del valor típico para materia-

les textiles, y por último el espesor del sustrato que típicamente son 3mm, y que se encuentra dentro del rango fijado en la sección anterior que oscila entre $0,005\lambda$ y $0,2\lambda$. La expresión que determina el radio en centímetros del parche [Roderick y Hall, 1989] es la que se especifica en la ecuación 4.1, donde F es la expresión de la ecuación 4.2, y h , es el espesor del sustrato en centímetros. Aplicando dicha expresión se obtiene un radio de unos 19.5 mm aproximadamente, así que se comenzarán las simulaciones para determinar la frecuencia de operación, y estudiar la adaptación de la antena.

$$r = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2 \cdot h}{\pi \epsilon_r \cdot F} [\ln(\frac{\pi \cdot F}{2 \cdot h}) + 1,7726]\right\}^{1/2}} [cm] \quad (4.1)$$

$$F = \frac{8,791 \cdot 10^9}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.2)$$

Para encontrar cual es el radio al que debemos ajustar nuestro parche para que la antena funcione bajo las especificaciones anteriores se ha simulado el funcionamiento de dicha antena en el simulador CST Microwave Studio variando el radio $\pm 10\%$. Como se puede observar en la gráfica 4.3 es para un tamaño de radio de 18.5mm para el cual la antena está adaptada a 2.45GHz y además situada por debajo de -10 dB en la práctica totalidad de la banda ISM (2.4GHz-2.45GHz), llegando en su punto central hasta valores de -40 dB.

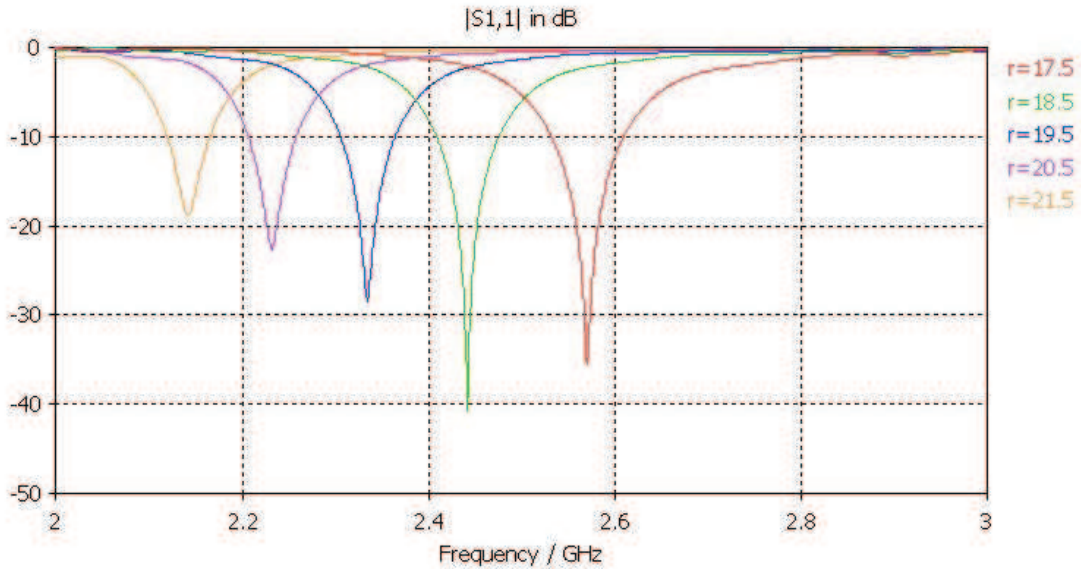


Figura 4.3. Variación del parámetro S_{11} en función de la variación del radio del parche (radio, r , en mm).

Se ha variado también el tamaño del plano de masa, manteniendo el radio fijo en 18.5 mm y variando el tamaño del parche un $\pm 10\%$. Los resultados de dicha variación se encuentran en la gráfica 4.4 y como se puede observar, la variación de los lados del

cuadrado que componen el plano de masa no incurren en un cambio drástico en lo que al funcionamiento del elemento radiante se refiere.

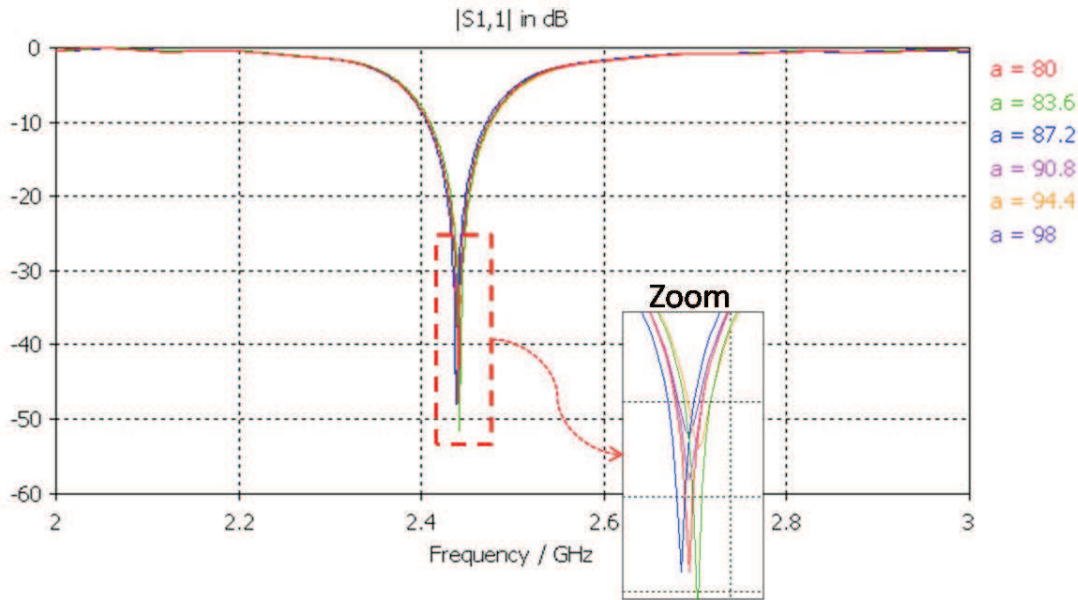


Figura 4.4. Variación del parámetro S_{11} en función de la variación del tamaño del plano de masa (lado, a , en mm).

Aunque el espesor del sustrato venga ya fijado por los valores típicos de las antenas textiles es interesante observar el comportamiento de la antena ante dicha variación y comprobar así si los valores típicos nos interesan en este caso. El parámetro se ha variado un $\pm 50\%$, y como se puede observar en la gráfica de la figura 4.5, la modificación del espesor del sustrato varía el comportamiento del elemento radiante. En este caso, con un radio de 18.5mm y un tamaño de 89mm de lado para el plano de masa es para un espesor de 3mm para el que se obtienen los mejores resultados de adaptación, si bien es cierto, que a mayor espesor, mayor será el ancho de banda. Para el caso que se trata utilizaremos un espesor de 3mm por cumplir con las especificaciones de ancho de banda y frecuencia central detalladas al comienzo de esta sección.

Las dimensiones finales de la antena se muestran en la figura 4.6. Además en 4.7 se observa su diagrama de radiación en tres dimensiones que nos servirá de guía en futuros capítulos para demostrar si se mejora o no la radiación trasera de este parche.

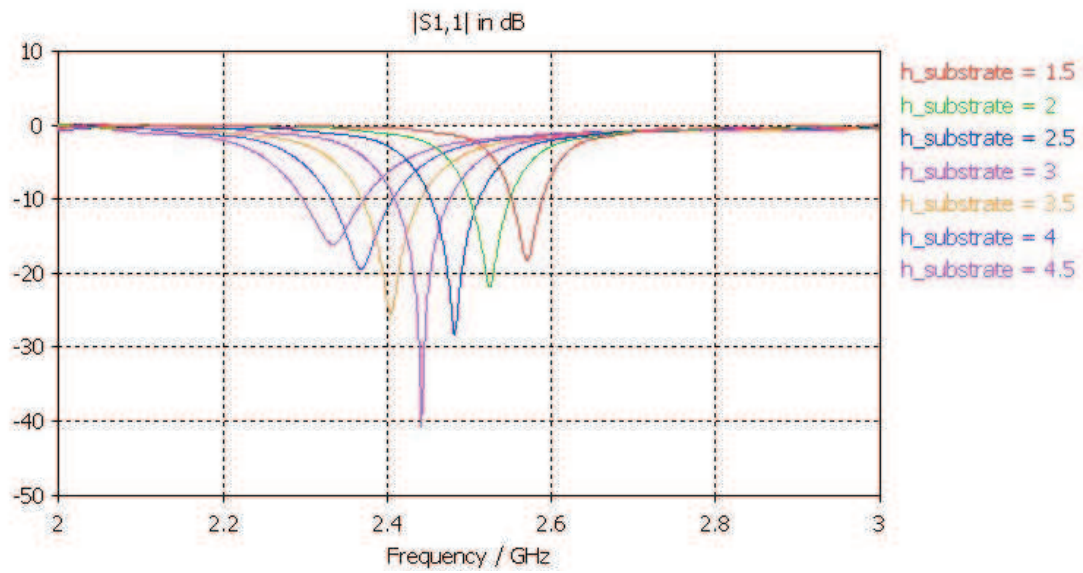


Figura 4.5. Variación del parámetro S_{11} en función de la variación del espesor del sustrato $h_{\text{substrate}}$ (en mm).

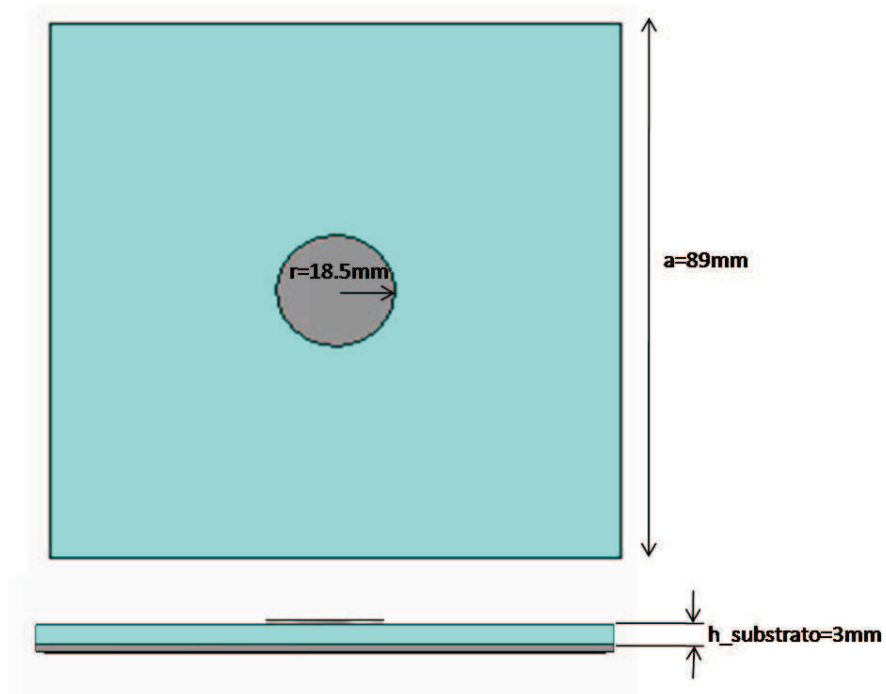


Figura 4.6. Esquema y dimensiones finales de la antena de parche.

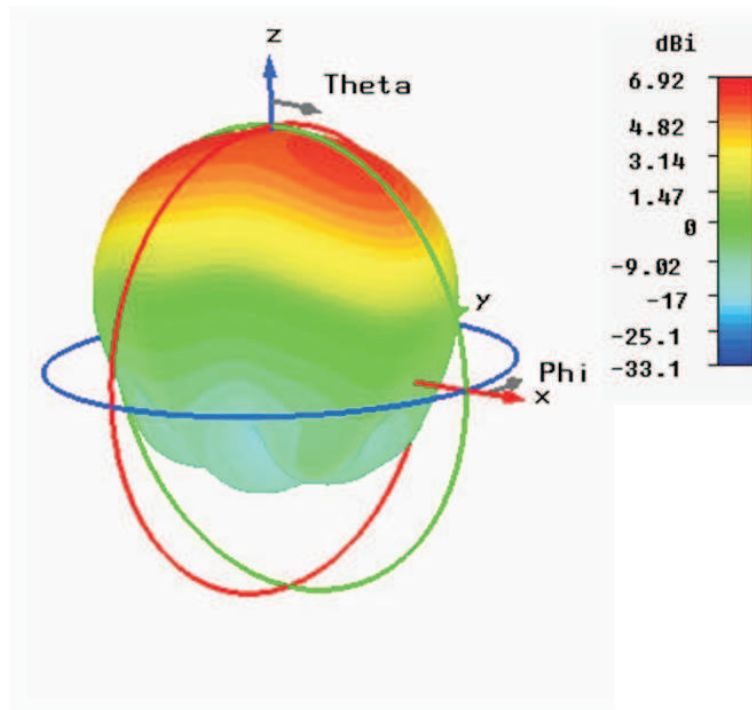


Figura 4.7. Diagrama de radiación de la antena.

CAPÍTULO 5

ANTENA Y SUPERFICIE SOFT

Hasta este capítulo se han diseñado ya dos tipos de superficies *Soft* junto con una antena de parche funcionando a 2.44 GHz. El siguiente paso es unir ambos diseños para así aplicar las características de las superficie *Soft* a la antena diseñada en el capítulo 4. De nuevo, en este capítulo, se hará uso del simulador CST Microwave Studio con el que se realizarán una serie de simulaciones que harán posible demostrar cómo la inclusión de la superficie *Soft* alrededor del parche resulta tanto en un incremento de la directividad como en una reducción de la radiación trasera.

Lo primero que se debe encontrar son los parámetros que consiguen que la superficie *Soft* filtre a la frecuencia deseada. A modo orientativo se puede analizar el parámetro S_{21} de la superficie *Soft* de igual manera que en el capítulo 3 y así se ha hecho en las figuras 5.1 y 5.2 para una combinación de parámetros dada (ver tabla 5.1); en ellas se advierte que atendiendo a este tipo de análisis ambas superficies alcanzan los mismos niveles de filtrado por lo que su elección dependerá de aspectos como, por ejemplo, el tipo de parche utilizado. Además, en las figuras 5.1 y 5.2, se observa también el caso en el que tan solo se cuenta con un plano de masa y un material dieléctrico sobre éste. Comparando esta curva con los casos en los que sí existe superficie *Soft* se aprecia como efectivamente se trata de una superficie filtrante ya que los niveles son menores en los casos en los que hay superficie *Soft*.

Una vez se ha encontrado una combinación orientativa de los parámetros de la superficie *Soft* se procede al análisis conjunto con el parche. En las figuras 5.3 y 5.4 se puede observar, respectivamente, la combinación de una superficie *Soft* rectangular con

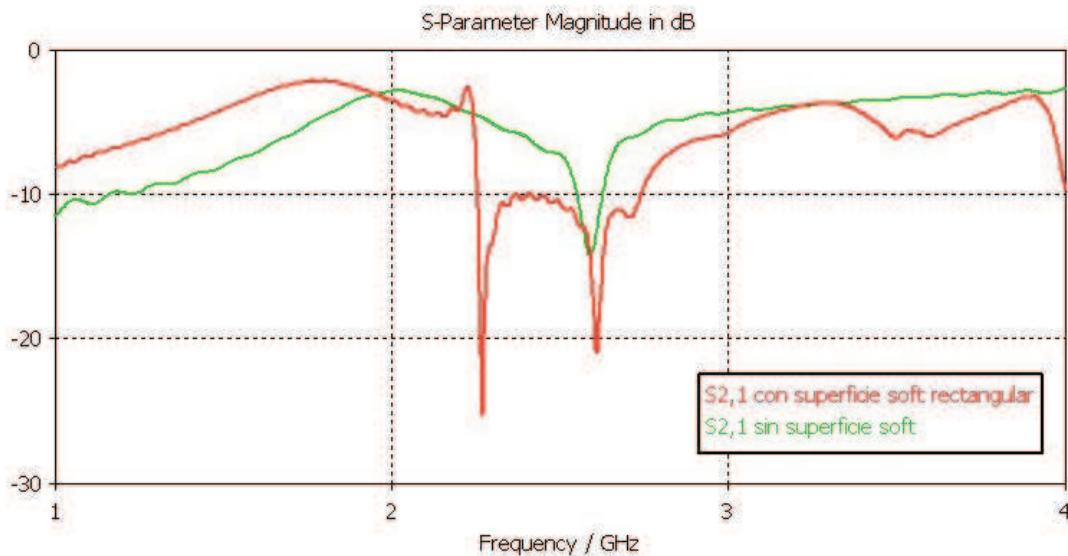


Figura 5.1. Parámetro S_{21} con y sin superficie *Soft* rectangular.

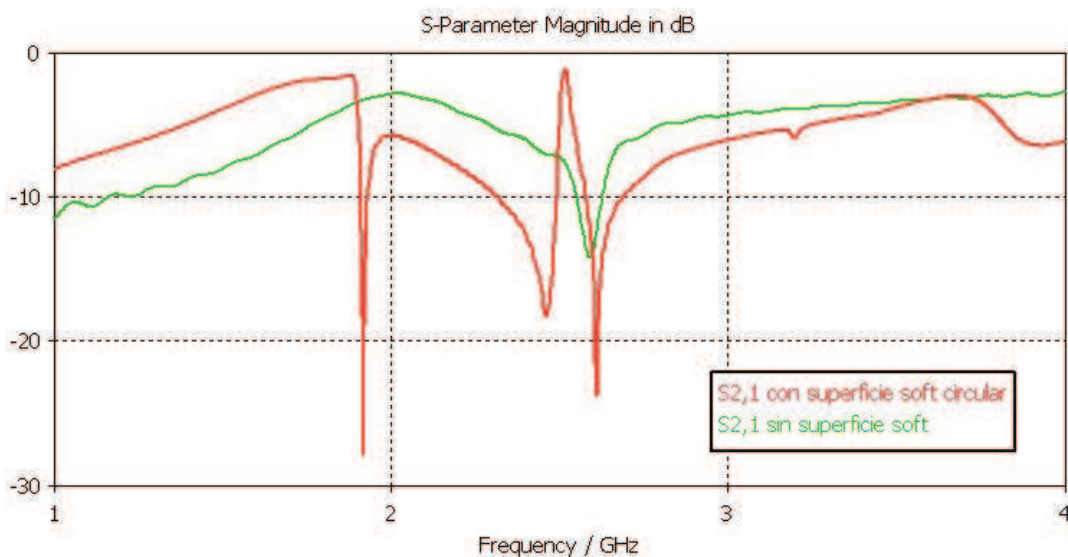


Figura 5.2. Parámetro S_{21} con y sin superficie *Soft* circular.

la antena de parche diseñada en 4 y la combinación de una superficie *Soft* circular con ésta misma antena. A continuación haremos un análisis comparativo de ambas para finalmente decantarnos por una o por otra para el diseño final, pero antes de continuar debemos analizar qué ocurre al unir la antena junto con la superficie *Soft* en una misma estructura. En primer lugar, la frecuencia de funcionamiento del parche ya que ésta disminuye en presencia de la superficie *Soft* (ver figuras 5.5 y 5.7). Ante este efecto se pueden tomar varias decisiones; una de ellas puede ser variar la posición de la alimentación y conseguir adaptarlo de nuevo a la frecuencia de funcionamiento deseada; una segunda opción es variar las dimensiones del parche compensando por la presencia de la

Cuadro 5.1. Tabla de Parámetros.

Parámetros Rectangular	Valor	Parámetros Circular	Valor
w	24	w	18.7
h	3	h	3
p	16	$p1$	20
N	6	N	2
g	3	g	3
$n \text{ vias}$	10	$p2$	25.5

superficie *Soft*, o por último, adaptar la superficie *Soft* a la nueva frecuencia de funcionamiento. Por simplicidad, únicamente para el caso rectangular, se tomó la decisión de mover la posición de la alimentación de las coordenadas originales (a 13 mm del centro del parche) a una nueva posición (a 9 mm del centro del parche)(ver figura 5.6) .

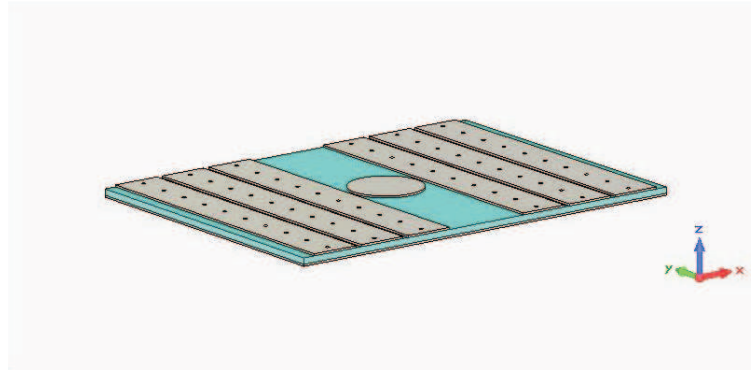


Figura 5.3. Esquema de la unión del parche con una superficie *Soft* rectangular.

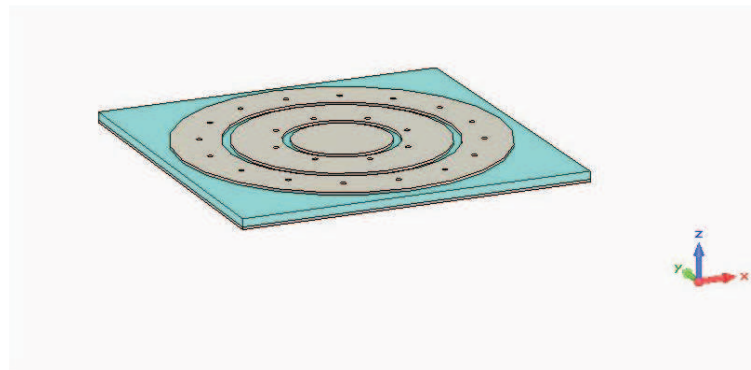


Figura 5.4. Imagen de la unión del parche con una superficie *Soft* circular.

Una vez adaptada la antena en la banda deseada, pasamos a analizar los diagramas

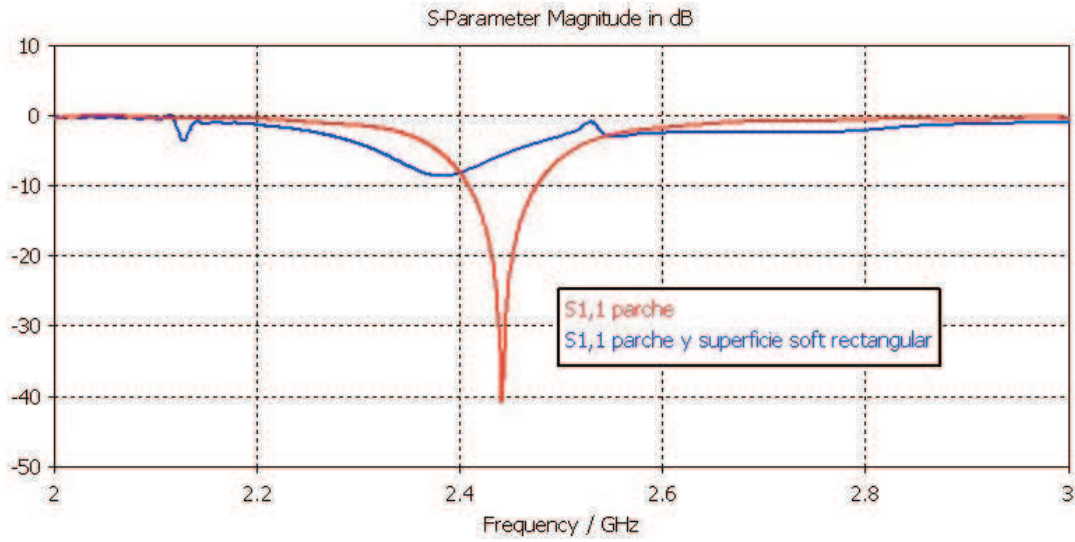


Figura 5.5. Parámetro S_{11} de la unión del parche con la superficie *Soft* rectangular.

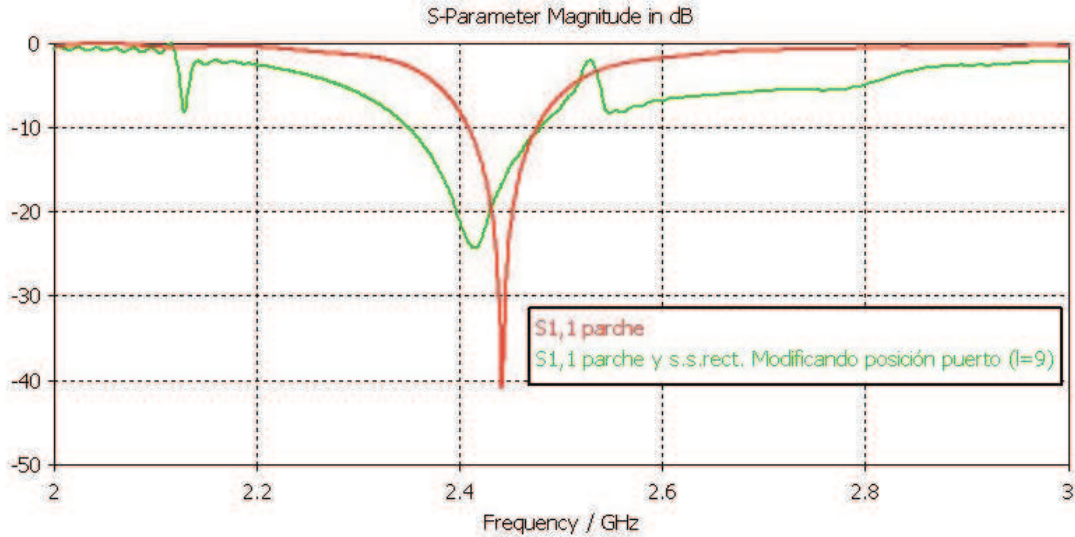


Figura 5.6. Esquema de la unión del parche con una superficie *Soft* rectangular variando la posición del puerto.

de radiación. Para ello comparemos el diagrama del parche con y sin superficie *Soft*. Estas simulaciones son las que aparecen en las figuras 5.9 y 5.8 , cortes del plano H y del plano E, y demuestran cómo la presencia de superficie *Soft*, tanto circular como cuadrada, reduce considerablemente el efecto de la radiación trasera. Los parámetros empleados, que son los que se muestran en la tabla (5.1), son el resultado de una serie de simulaciones en busca de la mejor entre el parche anteriormente definido y la superficie *Soft*, para conseguir el menor nivel de radiación trasera posible. Si se observa la gráfica que muestra el filtrado de la superficie *Soft* rectangular en la figura (5.1) se puede

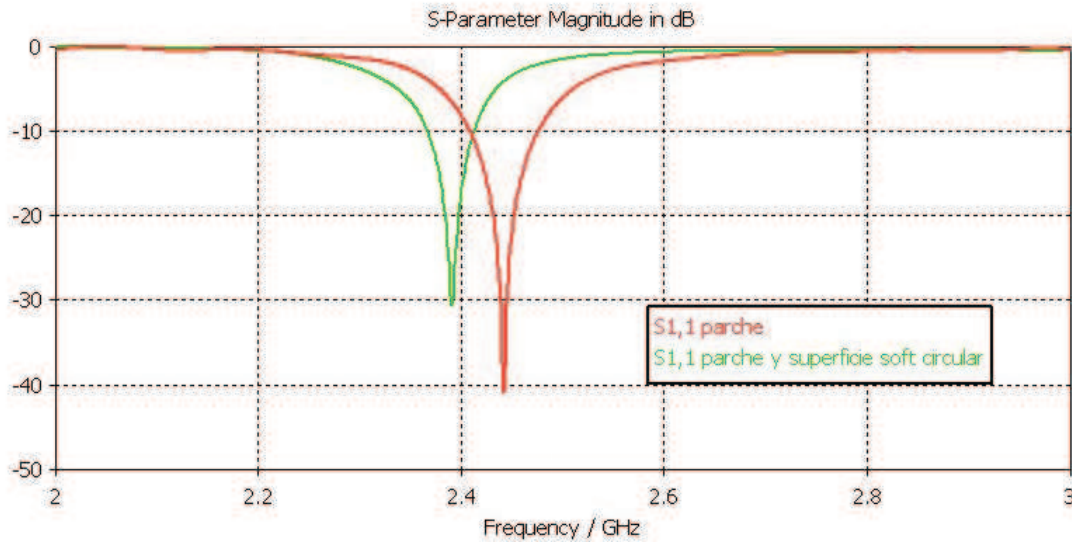


Figura 5.7. Parámetro S_{11} de la unión del parche con la superficie *Soft* circular.

apreciar como dicha estructura no tiene un pico a la nueva frecuencia de funcionamiento del parche (ver la figura 5.5), y lo mismo ocurre par a la superficie *Soft* circular, sin embargo, en las figuras 5.8 y 5.9 se aprecia que las superficies están haciendo su labor correctamente. Esto se debe a que el análisis del parámetro S_{21} se realizó sin el parche, así que la inclusión del mismo provoca que la frecuencia de funcionamiento de la superficie *Soft* varíe, colocándose el pico de filtrado a la misma frecuencia de funcionamiento del parche y con ello reduciendo la radiación trasera. Es por esto que el primer análisis del parámetro S_{21} deba ser considerado como orientativo puesto que a continuación se precisa realizar ciertas simulaciones para encontrar la combinación de parámetros, que en presencia del parche, dan el mejor resultado.

Aparentemente los resultados de las figuras 5.9 y 5.8 podrían ayudar a decantarse por el caso de la superficie *Soft* circular, pero para finalmente decidir entre un tipo de superficie *Soft* u otro puede resultar de utilidad una comparación numérica que resulte más exacta que la obtenida mediante los diagramas de radiación. Dicha comparación se realiza encontrando un valor porcentual de la radiación trasera con respecto a la radiación total (ver ecuación 5.1). En la tabla 5.2 se muestran los valores de radiación delantera (opuesta a la radiación trasera) donde se observa que la radiación trasera disminuye de un 8 % hasta un 6.5 % para el caso de la superficie *Soft* rectangular y hasta un 1.6 % para el caso de la superficie *Soft* circular.

$$RadiacinTrasera = \frac{Potencia\ de\ radiacin\ trasera}{Potencia\ total\ radiada} = \frac{\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \int_0^{2\pi} E^2 \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} E^2 \sin \theta d\theta d\phi} \quad (5.1)$$

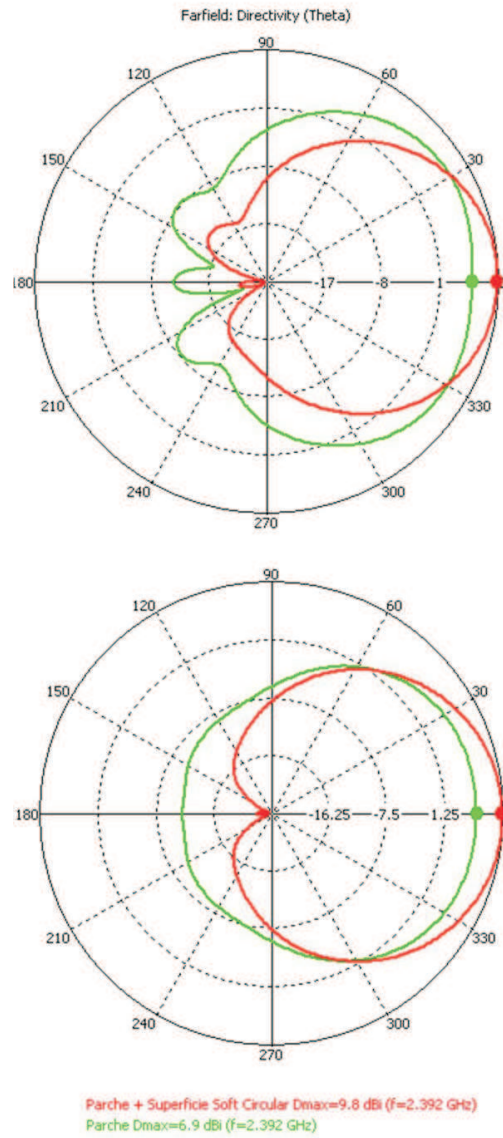


Figura 5.8. . Planos E y H del diagrama de radiación de la unión del parche con la superficie *Soft* circular..

Basándose en los resultados de la tabla 5.2 y en las perturbaciones a la hora de unir el parche con la superficie *Soft* se ha decidido utilizar una superficie *Soft* circular para el diseño final de la antena. Además puede resultar más intuitivo debido a la forma circular de ambos diseños: el parche y la superficie *Soft*. Como ya se indicó al inicio de este capítulo, cabe destacar también el hecho de que la inclusión de la superficie *Soft* incrementa la directividad de modelo al mismo tiempo que reduce la radiación trasera. El aumento de la directividad llega es de casi 3 dB en la máxima dirección de ésta (ver figuras 5.8 y 5.9).

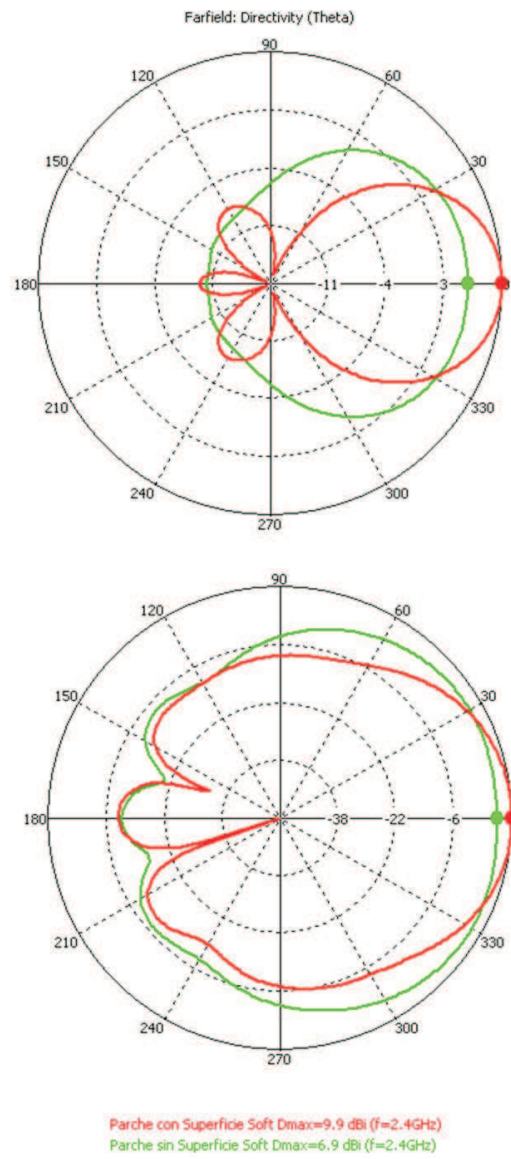


Figura 5.9. . Planos E y H del diagrama de radiación de la unión del parche con la superficie *Soft* rectangular..

Cuadro 5.2. Tabla Valores Radiación Delantera.

Estructura	Radiación Delantera
Parche	91,89 %
Parche y Superficie <i>Soft</i> Rectangular	93,49 %
Parche y Superficie <i>Soft</i> Rectangular	98,37 %

CAPÍTULO 6

CONFORMADO DE LA ANTENA Y LA SUPERFICIE SOFT

Debido al carácter textil de este diseño, el siguiente paso consiste en conformar esta antena simulando las distintas posibilidades de colocación cuando ésta se sitúe embebida en una prenda. Las posibles colocaciones de la antena sobre el cuerpo humano son el brazo, la espalda en la zona del hombro, las piernas, etc., en definitiva serán todas ellas zonas ligeramente curvadas. Por ello un modelo inicial de conformación podría ser un cilindro [Hertleer et al., 2007]. En este capítulo se realizará un estudio del efecto de dicha curvatura de la antenas, y se volverá a usar, como en los capítulos anteriores, CST MWS para realizar simulaciones.

Cabe esperar que las propiedades de la antena varíen dependiendo del radio del cilindro sobre el que ésta se conforme, así que se utilizarán varios cilindros de diferentes radios que simularán las distintas partes del cuerpo donde podría la antena ser colocada. En este capítulo se utilizará un cilindro de vacío, en el capítulo 7 dicho cilindro será sustituido por un modelo de cuerpo humano. El aspecto de la antena conformada se muestra en la figura 6.1. Este estudio se hará observando qué ocurre con los diagramas de radiación en sus planos fundamentales (plano E y plano H) y analizando cuál es el valor porcentual de radiación delantera.

En las figuras 6.2 y 6.3 se observan los cortes en el plano E y en el plano H respectivamente para la antena diseñada en el capítulo 4. En ambas se aprecia como cuanto más pequeño es el radio del cilindro más distorsionado es su diagrama de radiación con respecto al de radio infinito (antena sin conformar), pero a pesar de ello el aspecto es

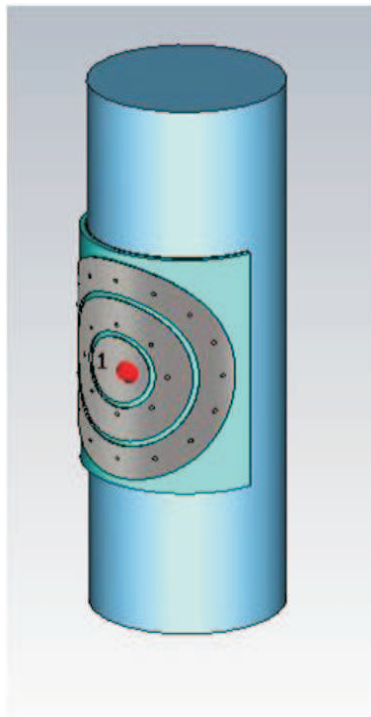


Figura 6.1. Antena y superficie *Soft* conformadas sobre cilindro.

tal y como cabría esperar de una antena de parche.

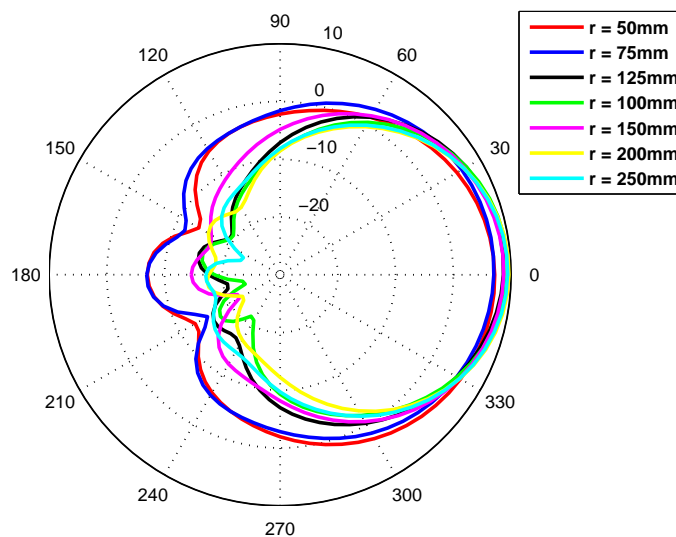


Figura 6.2. Plano E de los diagramas de radiación de la antena y la superficie *Soft* ante varios radios de cilindro.

Con estas mismas simulaciones se ha hecho un estudio numérico de la radiación delantera y los resultados se han plasmado en la gráfica de la figura 6.4. En esta gráfica se muestra con una línea continua el resultado de conformar la antena, sin superficie *Soft*,

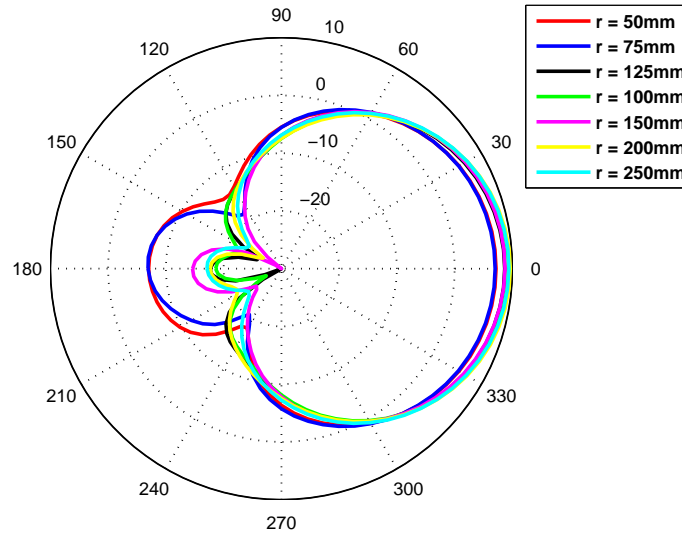


Figura 6.3. Plano H de los diagramas de radiación de la antena y la superficie *Soft* ante varios radios de cilindro.

sobre un cilindro cada vez más grande; y en línea discontinua el resultado de conformar la antena junto con la superficie *Soft*. A partir de dicha figura se observa como para un radio de 50mm, no sólo la superficie *Soft* no consigue reducir la radiación trasera del parche, sino que además la incrementa. Sin embargo, es llamativo el salto de la curva discontinua con respecto a la curva continua a partir de un radio de 75 mm, demostrando que a pesar de la conformación de la antena y la superficie *Soft*, esta estructura sigue funcionando como se espera y consigue reducir la radiación trasera, si bien es cierto que cuanto menor es el radio menor será la radiación delantera.

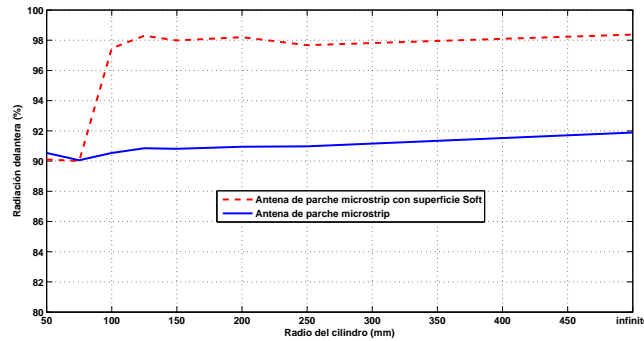


Figura 6.4. Relación entre el radio del cilindro (en mm) y la radiación delantera.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE LA ANTENA SOBRE EL MODELO DE CUERPO HUMANO

Como se mencionó en el capítulo 6 el siguiente paso después de torsionar el conjunto de la antena y la superficie soft sobre un cilindro de vacío es hacerlo sobre un modelo de cuerpo humano. El procedimiento y análisis es el mismo que en capítulo anterior, a diferencia del cilindro sobre el que se torsiona la estructura (que ahora seguirá un modelo humano), así que antes de comenzar con el análisis se procederá a describir el modelo de cuerpo humano.

7.1. Descripción del modelo de cuerpo humano

Para realizar un modelo del cuerpo humano se ha decidido emplear una superficie cilíndrica idéntica a la que se usó en el capítulo 6 pero en lugar de ser un cilindro de vacío, para este caso se rellenará de distintas capas que simulan la situación real en la que se podría encontrar la antena. En la la figura 7.1, se muestra la configuración empleada en la que un cilindro interno simulara el cuerpo humano. Rodeando este cilindro se ha incluido una capa de aire que se quedaría atrapado entre el brazo y la prenda. Por último el cilindro exterior simula la camisa o prenda en la que la antena está integrada. Este modelo más realista ha sido extraído de [Hertleer et al., 2009], en el cual el brazo se considera un medio con pérdidas, con una $\epsilon_r = 42$ y una $\vartheta = 0,99S/m$, (que son las propiedades eléctricas de la piel humana, que se usan como simplificación de todos los materiales contenidos en un brazo humano [Sanchez-Fernandez et al., 2010]), la ca-

pa de aire y por último la capa que representa a la prenda tiene una $\varepsilon_r = 1,85$ y una $\tan \vartheta = 0,015$. Tanto el espesor de la capa de aire como el espesor de la prenda de ropa se mantendrán invariables durante las simulaciones y tan solo se variará el tamaño del cilindro que representa el brazo.

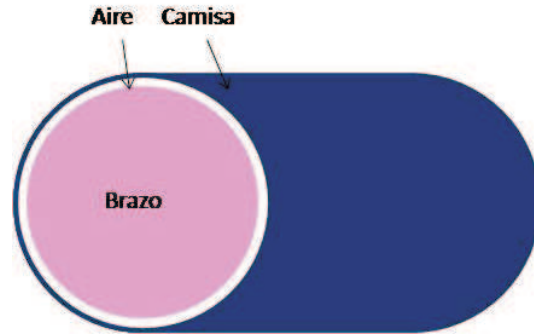


Figura 7.1. Modelo de cuerpo humano.

7.2. Análisis de la antena sobre el modelo de cuerpo humano

En esta sección se ha seguido el mismo procedimiento descrito en el capítulo anterior y se ha estudiado en simulación. La apariencia del conjunto de la antena y la superficie soft sobre el modelo de cuerpo humano se puede observar en la figura 7.2.

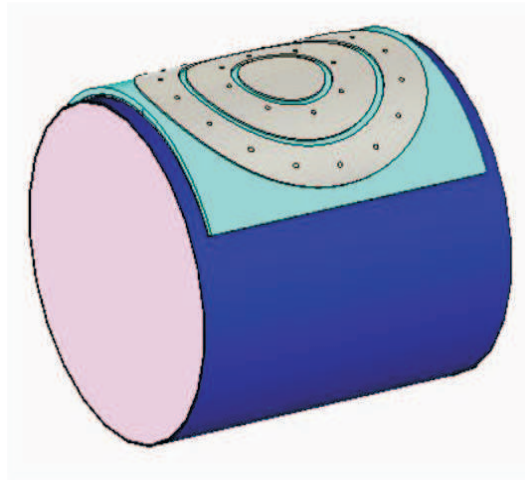


Figura 7.2. Antena y superficie soft sobre modelo de cuerpo humano.

Para que la comparación entre el caso en el que se conforma la antena sobre un cilindro de vacío y sobre un modelo de cuerpo humano fuera más sencilla se han utilizado los mismos valores para los radios, destacando que dicho radio incluye tanto la capa de aire como la prenda textil. Antes de comenzar se puede predecir que la incorporación de medios con pérdidas hará que presente menor eficiencia de radiación que para el caso

del cilindro de vacío, y que además igual que ocurría en el capítulo anterior, la curva de dependencia de la radiación delantera con el aumento del radio tendrá una pendiente positiva.

A continuación se presentan los resultados en forma de diagramas de radiación, concretamente los cortes más representativos: plano E y plano H, los cuales se observan en la figuras 7.3 y 7.4. La antena sigue funcionando a pesar de la torisión y de la inclusión del modelo de cuerpo humano y a mayor radio (tal y como ocurría en el caso de cilindro de vacío, capítulo 6), más cerca se está del caso plano y por ello se da una mejor radiación delantera.

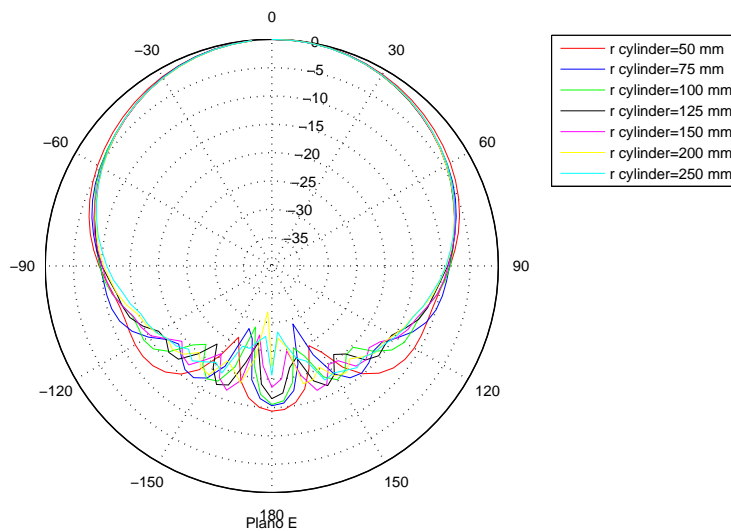


Figura 7.3. Plano E del diagrama de radiación.

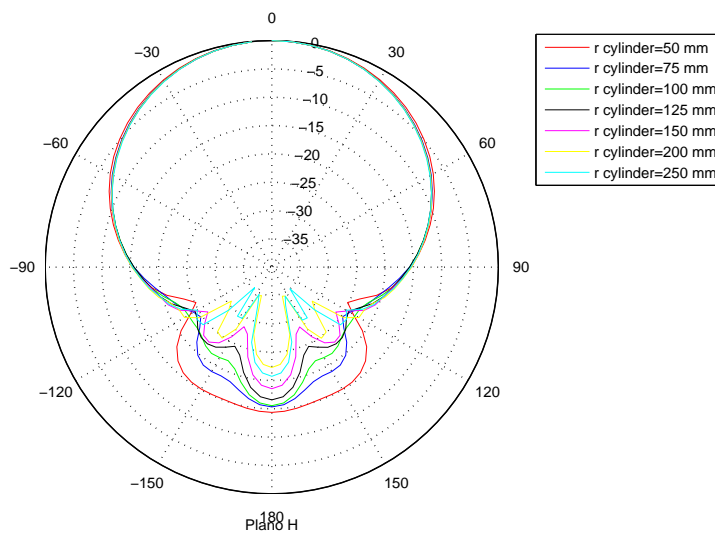


Figura 7.4. Plano H del diagrama de radiación.

Otra forma de presentar estos resultados se puede llevar a cabo calculando su radiación delantera, y compararla con el caso en el que no hay superficie soft, es decir, el caso del parche a solas. Esta representación se puede observar en la figura 7.5 donde se aprecia como la presencia de superficie soft hace que la radiación delantera aumente si se compara con el caso en el que no existe superficie soft, además, a partir de un radio de 100mm la antena comienza a emitir con unos valores de radiación delantera crecientes.

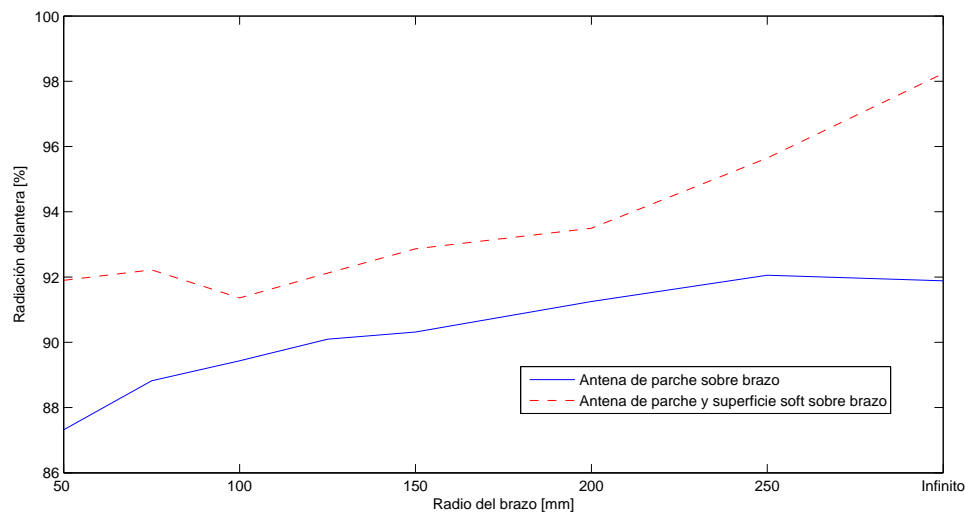


Figura 7.5. Relación entre el radio del brazo (en mm) y el porcentaje de radiación delantera.

Por último, se ha considerado que resultar interesante una comparativa del caso en el que el cilindro es de vacío con el caso en el que representa el cuerpo humano. Esta comparativa se muestra en la figura 7.6, en la cual se puede observar como para el caso en el que el cuerpo humano está presente la eficiencia de radiación es menor y por tanto el porcentaje de radiación delantera también serán menores. Cabe destacar también que la diferencia entre las curvas con y sin superficie soft es mucho mayor para el caso en el que el cilindro es de vacío que para el caso en el que el cilindro representa el cuerpo humano.

Con lo expuesto anteriormente se puede llegar a la conclusión de que la antena seguirá funcionando si se conforma alrededor de una parte del cuerpo humano, aunque sus niveles de radiación delantera serán menores.

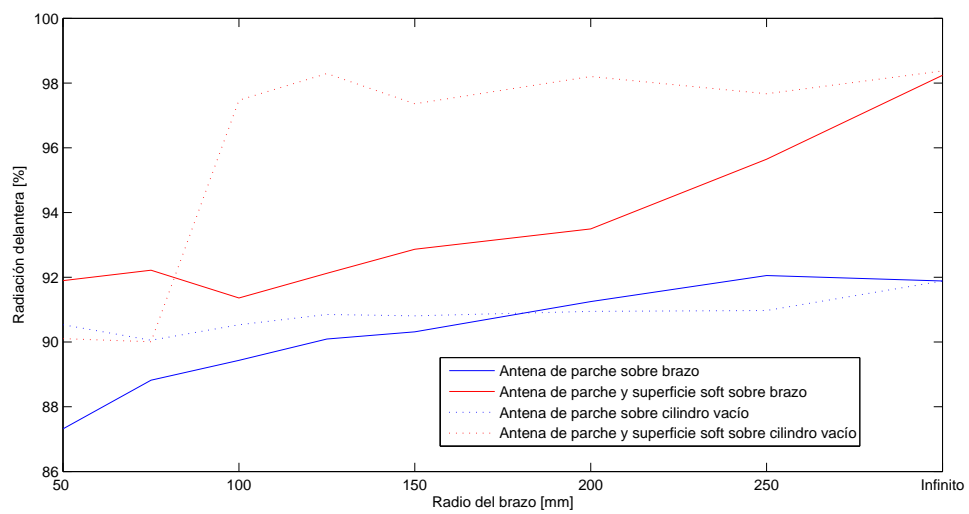


Figura 7.6. Comparación entre la presencia y la ausencia del cuerpo humano.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se muestran los resultados experimentales tras la fabricación de dos prototipos de la antena diseñada. Las dimensiones de dichos prototipos tienen las dimensiones de la antena descrita en 4. El primero de ellos es la antena de parche microstrip sin la superficie *Soft* cuya fotografía se presenta en la figura 8.1 y el segundo es esta misma antena rodeada de la superficie *Soft* (ver figura 8.2). En este caso, los prototipos han sido fabricados con materiales rígidos; PVC como material dieléctrico ($\epsilon_r = 3$), cobre como material conductor y hilo de cobre para reproducir los cortocircuitos de las superficies *Soft*.

Las medidas tomadas para los parámetros de ambos prototipos se muestran en la figura 8.3. En la figura 8.3 se muestra el módulo del parámetro S_{11} medido para los prototipos antes mencionados (es decir, antena con y sin superficie *Soft*). Este parámetro ha sido normalizado respecto a una impedancia de 50Ω y como se aprecia en la figura se encuentran ligeramente desajustados. Este hecho se corrobora observando la parte real medida de la impedancia que se muestra en la figura 8.4. Sin embargo, el ancho de banda y la forma de la respuesta en frecuencia se aproximan a lo predicho en las simulaciones (figura 8.5), aunque la frecuencia se ha desplazado a rangos ligeramente superiores de funcionamiento.

Sería necesaria una validación de los resultados con medidas de eficiencia de radiación en cámaras de reverberación (para analizar si hay pérdidas debidas a las propiedades resonantes de la superficie *soft*); así como medidas en una cámara anecoica en la que se podría verificar el aumento de radiación delantera (o disminución de la trasera). Pese

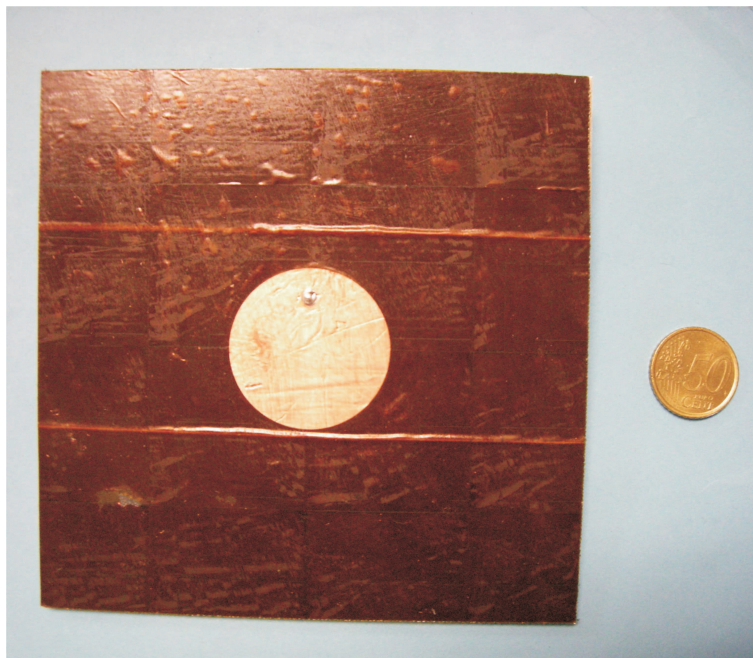


Figura 8.1. Imagen del prototipo fabricado de antena de parche microstrip.

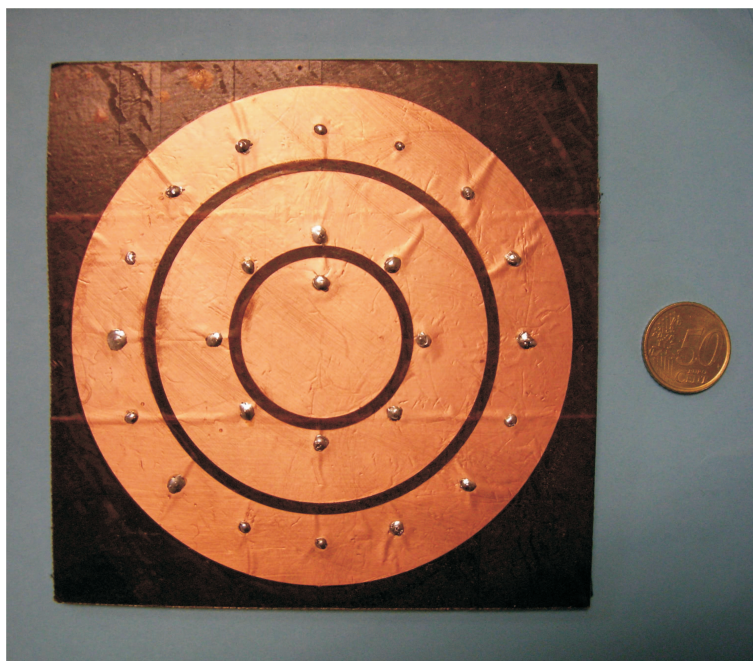


Figura 8.2. Imagen del prototipo fabricado de antena de parche microstrip junto con superficie *Soft*.

a haberse realizado un prototipo y haberse medido en adaptación, por motivos logísticos, no fue posible realizar las medidas de radiación. También resultaría interesante, la inclusión de medidas con los materiales textiles (y no con los rígidos de características

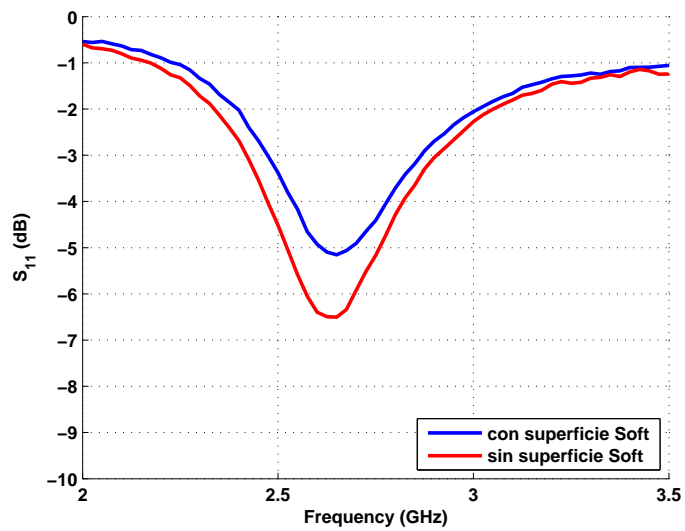


Figura 8.3. Medidas del parámetro S_{11} para los casos con y sin superficie *Soft*.

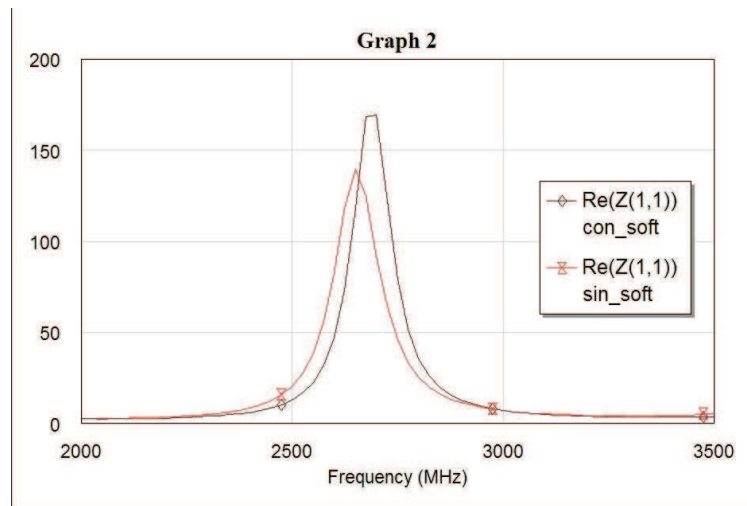


Figura 8.4. Impedancia Real del parámetro S_{11} para los casos con y sin superficie *Soft*.

similares).

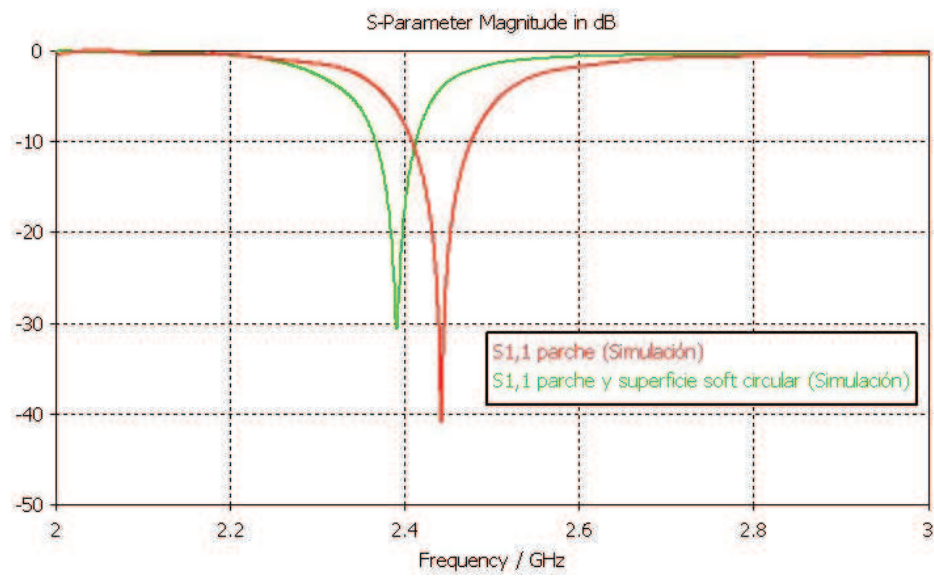


Figura 8.5. Parámetro S_{11} para los casos con y sin superficie *Soft* obtenidos en simulación.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

9.1. Conclusiones

En este trabajo se han unido dos conceptos a priori distintos, como lo son una antena de parche y una superficie *Soft*, para el diseño de antenas textiles con bajo nivel de radiación trasera..

En primer lugar, en el presente proyecto se ha recopilado información sobre los materiales textiles existentes en el mercado. Aunque todavía no existan materiales específicos que cumplan las funciones de los materiales rígidos en las antenas microstrip, bien es cierto que se cuenta con una gran variedad de materiales textiles, que a pesar de no haber sido pensados específicamente para ello, pueden emplearse satisfactoriamente para este tipo de aplicaciones.

A continuación se ha realizado un análisis de las superficies *Soft* en el que se demostró que efectivamente permiten la reducción de ondas superficiales, y por consiguiente pueden ser empleadas para aumentar la directividad de antenas de parche en la dirección perpendicular a las mismas. Además, éstas pueden diseñarse para un rango muy amplio de frecuencias e incluso con variabilidad de formas. Para validar estos resultados, se utilizó una superficie *Soft* en tecnología microstrip funcionando a 2.4 GHz junto a una antena microtira de parche circular funcionando a esa misma frecuencia, obteniendo una reducción de la radiación trasera de más de un 6 % y aumentando la directividad en más de 3dB.

La última parte del trabajo se centró en el carácter textil de la antena sometiéndola junto con la superficie *Soft* a corrugaciones parecidas a las que se podría ver afectada

durante su uso real. La alteración que con más posibilidades acabará sufriendo una antena textil es una torsión cilíndrica de la misma, así que se consideraron dos casos de estudio: la torsión cilíndrica de la antena rodeada de vacío y la torsión cilíndrica de dicha antena pero sobre un modelo de cuerpo humano. Para validar los resultados se realizaron simulaciones con y sin superficie *Soft*, valorándose la mejora de prestaciones debida a dicha superficie, y estudiándose también cómo dicha mejora estaba influenciada por el radio de la conformación. A mayor radio del cilindro sobre el que se encontraba la antena, menor es la degradación de las prestaciones con respecto a la versión planar, es decir, la radiación delantera adopta valores más altos. A pesar de ello, la inclusión de la superficie *Soft* producía mejoras (respecto al caso de antena sin superficie) para conformaciones moderadas de la antena. Por otro lado, en lo relativo a la simulación en la que se incluyen materiales biológicos, debemos resaltar que la presencia del cuerpo humano incorpora pérdidas al modelo lo que implica un peor funcionamiento de la antena si se compara con el caso en el que está rodeada de vacío, sin embargo, las prestaciones en cuanto a niveles de radiación trasera/delantera también mejoraban con respecto al caso de no tener superficie *soft*, alcanzando valores superiores al 95 % de radiación delantera en presencia del modelo de cuerpo humano.

Por último, se procedió a medir un prototipo realizado sobre materiales de características parecidas a las textiles, pero rígidas con resultados prometedores en términos de adaptación. En general, y a modo de resumen y conclusión, se ha llegado a unos resultados muy esperanzadores y novedosos que animan a seguir investigando en este campo todavía muy inmaduro.

9.2. Futuras líneas de trabajo

Como posibles líneas de trabajo se destacarán las siguientes. La primera de ellas atañe una investigación más directa con los materiales existentes en el mercado. Aunque muchos de los materiales que se pueden utilizar son creaciones de la ingeniería textil no están lo suficientemente analizados como para extraer una sus eléctricas para definir un buen modelo de simulación, lo cual producirá imperfecciones en cuanto a características de radiación en los primeros prototipos que pretendan ser realizados. Por ello, un estudio en el que se establezcan las propiedades básicas de los mismos queda abierto para trabajos futuros.

Una segunda línea de investigación tiene que ver con las posibles pruebas a las que se puede someter a una antena textil mas allá de las torsiones cilíndricas que aquí se han tratado. Principalmente aquellas que atienden a las típicas arrugas que se dan en las prendas de vestir en las zonas de flexión de las articulaciones o en zonas arbitrarias de los materiales textiles. Estas arrugas también podrían variar en tamaño y disposición y

tendrían una distribución como la que se muestra en la figura 9.1. Otro tipo de pruebas que se podrían realizar para comprobar el correcto funcionamiento de la antena, son pruebas de humedad y temperatura, comprobando así que hasta que niveles funcionará la antena y cual es su tolerancia a estos parámetros atmosféricos.

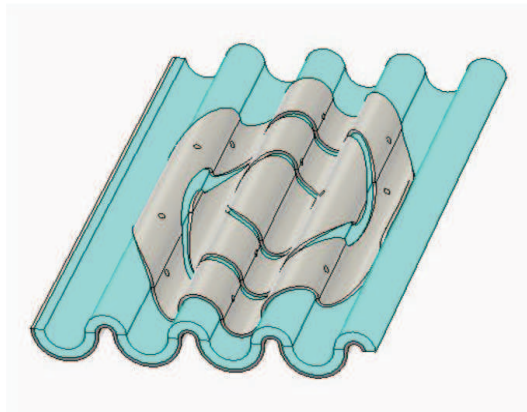


Figura 9.1. Arrugas que podría sufrir la antena textil.

Otra línea futura podría orientarse a la modificación de la polarización de la antena, y la influencia que dicha polarización tiene sobre la efectividad de las superficies soft. La antena que aquí se ha diseñado tiene polarización lineal, pero una antena textil pretende ir adherida a una prenda de vestir que a su vez transportará una persona en constante movimiento, por lo que debería intentar capturar las dos polarizaciones ortogonales que se reciban en un medio altamente dispersivo.

Por último, mencionar de nuevo que es de interés la realización de medidas en cámaras de reverberación y cámaras anecoicas con prototipos textiles, para la validación final de los resultados aquí presentados.

APÉNDICES

APÉNDICE A

RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS $p1$ Y $p2$ DE UNA SUPERFICIE SOFT CIRCULAR

En este apéndice se explicará cual es la relación que mantienen los parámetros $p1$ y $p2$ pertenecientes a una estructura soft circular. Si se observa la figura 3.22 del capítulo 3 se observa como un aumento de $p2$ hara que el radio de los anillos aumente y por tanto debamos aumentar el número de vías que atraviesan cada anillo para seguir manteniendo el periodo $p1$ como lo establecido antes de aumentar $p2$. Si lo que se quiere es mantener el número de vías fijo entonces se deberá incrementar el periodo $p1$ para que éstas sean capaces de cubrir todo el anillo con un periodo constante.

A continuación se mostrarán una serie de expresiones que relacionan estos tres parámetros entre sí ($p1$, $p2$ y *número de vías*) y que deben mantenerse a la hora de diseñar una superficie Soft circular de este tipo. La figura A.1 puede resultar de ayuda a la hora de deducir estas ecuaciones.

$$n_{vias} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p2}{p1} \quad (A.1)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{n_{vias}} \quad (A.2)$$

La ecuación A.1 especifica el número de vías que debe haber a lo largo del anillo, nos es más que la división del perímetro de la circunferencia de radio $p2$ entre el número de vías que deben colocarse a lo largo de dicha circunferencia. Por otro lado, la ecuación A.2 define el ángulo al que deben colocarse cada una de estas vías (ver figura A.1), es

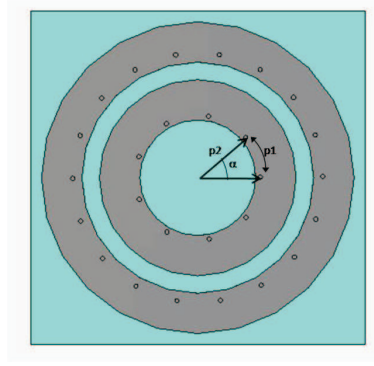


Figura A.1. . Relación entre los parámetros $p1$ y $p2$.

decir, divide los 2π radianes de la circunferencia entre el número de vías que debemos colocar. Por último si sustituimos A.1 en A.2 obtenemos la relación del ángulo de la figura A.1 con los parámetros $p1$ y $p2$. Dicha relación es la de la expresión A.3.

$$\alpha = \frac{p1}{p2} \quad (A.3)$$

APÉNDICE B

PRESUPUESTO

Para la realización de este proyecto se ha seguido un proceso cronológico que parte de la lectura y documentación y llega hasta un prototipo final que implementa el diseño realizado. Se han empleado un total de ocho meses desde el comienzo hasta la defensa final. A continuación se especifican las fases del proyecto junto con el tiempo empleado para su realización.

1. Estudio del Estado del arte: 8 semanas.

Esta fase consistió en una intensa lectura de la documentación existente, constando principalmente de publicaciones en revistas científica como el IEEE.

2. Estudio y elección de los materiales: 4 semanas.

Gran parte de esta fase fue indirectamente realizada en el etapa anterior ya que fue la lectura de la experiencia de otros investigadores lo que me dio el criterio suficiente para la elección. En este caso el estudio no involucró solamente artículos sino también recursos de información de empresas dedicadas a la ingeniería textil.

3. Estudio Superficies Soft y Hard: 4 semanas.

Para el desarrollo de esta fase fueron importantes los conocimientos previos teóricos y una tediosa lectura del material publicado.

4. Diseño de la antena: 2 semanas.

Esta tarea consistió en un diseño estándar, por lo que con la literatura existente, y el material recopilado hasta el momento fueron necesarias dos semanas para su realización.

5. Combinación de la antena y superficie *Soft*: 3 semanas.

En esta fase se llevó a cabo la aneión de la antena con la superficie filtrante. El efecto

de la superficie sobre la operación de la antena requirió 3 semanas de trabajo, puesto que hubo que rediseñar el conjunto por unos problemas relacionados con su frecuencia de operación.

6. Conformado de la antena y la superficie Soft: 3 semanas.

El conformado de la antena fue la fase más innovadora del proyecto, puesto que este tipo de estudio no había sido realizado con anterioridad en la literatura. Este estudio vino determinado por la aplicación final de la antena (sobre un material textil) en el que podrían darse conformaciones cilíndricas de la misma.

7. Análisis de la antena sobre el modelo de cuerpo humano: 2 semanas.

Esta fase fue preciso obtener información sobre los modelos humanos empleados anteriormente en la literatura, así como de las propiedades electromagnéticas de dichos materiales; aunque el proceso de simulación y obtención de resultados fue análogo al empleado con conformaciones sobre vacío.

8. Construcción y medida de los prototipos: 4 semanas.

Una vez diseñada la antena y la superficie soft se procedió a su fabricación con materiales rígidos en el laboratorio de fabricación del Grupo de Radiofrecuencia de la Universidad Carlos III de Madrid.

Las medidas se realizaron con un analizador de redes en el propio laboratorio, enfocando la antena hacia elementos absorbentes de una cámara anecoica.

9. Escritura de la memoria: 4 semanas.

En esta fase se recopiló toda la información obtenida durante el proyecto y se plasmó en el presente documento.

En la figura B.1 se muestra de manera más visual el desarrollo temporal del proyecto.

FASE	1								2				3				4	
SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

FASE	5			6			7	8				9				
SEMANA	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34

Figura B.1. Desarrollo temporal del proyecto.

B.1. Costes

A este proyecto también van asociados costes económicos. Se destina la labor de diseñar la antena a un ingeniero superior durante el tiempo estimado anteriormente. Dicho trabajo puede ser llevado a cabo por un ingeniero novato con lo que su salario oscilará alrededor de los 1200 €/mes, lo que supone un coste de 1200 €/mes x 8 meses = 9600€.

<i>Ingeniero (durante 8 meses, con un coste de 1200 €/mes)</i>	9 600 €
<i>Estación de trabajo</i>	1 000 €
<i>Simulador</i>	21 000 €
<i>Herramientas de medida</i>	1000 €
<i>Materiales</i>	400 €
Total	33 000 €

Cuadro B.1. Costes de material. Costes imputables.

Para el diseño de la antena hace falta una serie de herramientas. Una estación de trabajo que conste del simulador CST Microwave Studio. El coste de la estación de trabajo, contando con que no será destinado únicamente al diseño que aquí se trata, oscilará alrededor de 1000€. A dicho coste debemos añadirle el precio de una licencia del simulador, la cual asciende hasta los 20000€.

El proceso de medida utilizó un analizador de redes cuyo precio puede ser superior a 50000 €, sin embargo, podría haber sido pagado a un centro de investigación para un uso puntual que puede rondar entre 500 y 1000 €.

El proceso de fabricación de los dos prototipos lo estimaremos en 400 €, aunque se desconoce el precio real, pues fue fabricado en el laboratorio del grupo de radiofrecuencia a disposición de los estudiantes. En dicha estimación se incluyen los materiales utilizados (PVC, cobre, capton y aluminio).

En la tabla B.1 se muestran los costes económicos desglosados de la realización del proyecto, todo ello nos da un total de 33000€.

Bibliografía

- [Bai y Langley, 2009a] Q. BAI y R. LANGLEY, “Crumpled integrated AMC antenna”, *Electronics Letters*, 45(13):662 –663, 2009a.
- [Bai y Langley, 2009b] Q. BAI y R. LANGLEY, “Crumpled textile antennas”, *Electronics Letters*, 45(9):436 –438, 2009b.
- [Chen, 2007] Z. N. CHEN, *Antennas for portable devices*, Wiley, 2007.
- [Cibin et al., 2004] C. CIBIN, P. LEUCHTMANN, M. GIMERSKY, R. VAHLDIECK y S. MOSCIBRODA, “A flexible wearable antenna”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE*, volumen 4, págs. 3589 – 3592 Vol.4, 2004.
- [CNMAT The Center for Music and New Audio Technologies, 2010] CNMAT
THE CENTER FOR MUSIC AND NEW AUDIO TECHNOLOGIES,
<http://cnmat.berkeley.edu/>, 2010.
- [DeJean et al., 2005] G. DEJEAN, R. BAIRAVASUBRAMANIAN, D. THOMPSON, G. PONCHAK, M. TENTZERIS y J. PAPAPOLYMEROU, “Liquid Crystal polymer (LCP): a new organic material for the development of multilayer dual-frequency/dual-polarization flexible antenna arrays”, *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 4:22 – 26, 2005.
- [Den et al., 2006] I.-C. DEN, R.-J. LIN, K.-M. CHANG y J.-B. CHEN, “Study of a circularly polarized CPW-fed inductive square slot antenna”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(8):1665 –1667, 2006.
- [Floc’h et al., 2009] J. FLOC’H, F. QUEUDET, H. RMILI y E. FOURN, “Investigation of radiating jeans-button antennas”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(12):2820 – 2824, 2009.
- [Grzyb et al., 2003] J. GRZYP, I. RUIZ, D. COTTET y G. TROSTER, “An investigation of the material and process parameters for thin-film MCM-D and MCM-L techno-

- ologies up to 100GHz”, en *Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings. 53rd*, págs. 478 – 486, 2003.
- [Hertleer et al., 2009] C. HERTLEER, H. ROGIER, L. VALLOZZI y L. VAN LANGENHOVE, “A Textile Antenna for Off-Body Communication Integrated Into Protective Clothing for Firefighters”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 57(4):919 –925, 2009.
- [Hertleer et al., 2007] C. HERTLEER, A. TRONQUO, H. ROGIER, L. VALLOZZI y L. VAN LANGENHOVE, “Aperture-Coupled Patch Antenna for Integration Into Wearable Textile Systems”, *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 6:392 –395, 2007.
- [ITU-International Telecommunication Union Web Site, 2010] ITU-INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION WEB SITE, <http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>, 2010.
- [Kennedy et al., 2009] T. KENNEDY, P. FINK, A. CHU, N. CHAMPAGNE, G. LIN y M. KHAYAT, “Body-Worn E-Textile Antennas: The Good, the Low-Mass, and the Conformal”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 57(4):910 –918, abril 2009.
- [Kildal, 1988] P.-S. KILDAL, “Definition of artificially soft and hard surfaces for electromagnetic waves”, *Electronics Letters*, 24(3):168 –170, febrero 1988.
- [Kildal, 1993] P.-S. KILDAL, “Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics and their application to antenna design”, págs. 30 –33, septiembre 1993.
- [Kildal y Best, 2008] P.-S. KILDAL y S. BEST, “Further investigations of fundamental directivity limitations of small antennas with and without ground planes”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE*, págs. 1 –4, 2008.
- [Klemm et al., 2004] M. KLEMM, I. LOCHER y G. TROSTER, “A novel circularly polarized textile antenna for wearable applications”, en *Wireless Technology, 2004. 7th European Conference on*, págs. 285 – 288, 2004.
- [Locher et al., 2006] I. LOCHER, M. KLEMM, T. KIRSTEIN y G. TROSTER, “Design and Characterization of Purely Textile Patch Antennas”, *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, 29(4):777 –788, noviembre 2006.
- [Massey, 2001] P. MASSEY, “GSM fabric antenna for mobile phones integrated within clothing”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE*, volumen 3, págs. 452 –455 vol.3, 2001.

- [Ouyang y Chappell, 2007] Y. OUYANG y W. CHAPPELL, “Distributed Body-worn Transceiver System with the Use of Electro-textile Antennas”, en *Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S International*, págs. 1229 –1232, junio 2007.
- [Ouyang et al., 2005] Y. OUYANG, E. KARAYIANNI y W. CHAPPELL, “Effect of fabric patterns on electrotexile patch antennas”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, volumen 2B, págs. 246 – 249 vol. 2B, julio 2005.
- [Pablo, 2009] A. C. PABLO, *Diseño de superficies Soft de doble banda y su aplicación a antenas de parche*, Tesis de Máster, 2009.
- [Rajo-Iglesias et al., 2007] E. RAJO-IGLESIAS, M. CAIAZZO, L. INCLAN-SANCHEZ y P.-S. KILDAL, “Comparison of bandgaps of mushroom-type EBG surface and corrugated and strip-type soft surfaces”, *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 1(1):184 –189, febrero 2007.
- [Rajo-Iglesias et al., 2009a] E. RAJO-IGLESIAS, O. QUEVEDO-TERUEL y L. INCLAN-SANCHEZ, “Back Radiation Reduction in Patch Antennas Using Planar Soft Surfaces”, *Progress in Electromagnetics Research (PIER) Letters*, 6:123–130, 2009a.
- [Rajo-Iglesias et al., 2009b] E. RAJO-IGLESIAS, O. QUEVEDO-TERUEL y L. INCLAN-SANCHEZ, “Planar Soft Surfaces and Their Application to Mutual Coupling Reduction”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 57(12):3852 –3859, diciembre 2009b.
- [Rajo-Iglesias et al., 2009c] E. RAJO-IGLESIAS, J.-L. VAZQUEZ-ROY, O. QUEVEDO-TERUEL y L. INCLAN-SANCHEZ, “Dual band planar soft surfaces”, *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 3(5):742 –748, agosto 2009c.
- [Ramesh Garg, 2001] I. B. A. I. RAMESH GARG, PRAKASH BHARTIA, *Microstrip antenna design handbook*, Artech House, 2001.
- [Roderick y Hall, 1989] J. RODERICK y P. HALL, *Handbook of microstrip antennas*, Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [Salonen et al., 2005] P. SALONEN, J. KIM y Y. RAHMAT-SAMII, “Dual-band E-shaped patch wearable textile antenna”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, volumen 1A, págs. 466 – 469 Vol. 1A, julio 2005.
- [Salonen et al., 2004a] P. SALONEN, Y. RAHMAT-SAMII, H. HURME y M. KIVIKOSKI, “Effect of conductive material on wearable antenna performance: a case study of

- WLAN antennas”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE*, volumen 1, págs. 455 – 458 Vol.1, junio 2004a.
- [Salonen et al., 2004b] P. SALONEN, F. YANG, Y. RAHMAT-SAMII y M. KIVIKOSKI, “WEBGA - wearable electromagnetic band-gap antenna”, en *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE*, volumen 1, págs. 451 – 454 Vol.1, junio 2004b.
- [Sanchez-Fernandez et al., 2010] C. SANCHEZ-FERNANDEZ, O. QUEVEDO-TERUEL, J. REQUENA-CARRION, L. INCLAN-SANCHEZ y E. RAJO-IGLESIAS, “Dual-band microstrip patch antenna based on short-circuited ring and spiral resonators for implantable medical devices”, *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 4(8):1048 –1055, agosto 2010.
- [Santas et al., 2007] J. SANTAS, A. ALOMAINY y Y. HAO, “Textile Antennas for On-Body Communications: Techniques and Properties”, en *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*, págs. 1 –4, noviembre 2007.
- [Sanz-Izquierdo et al., 2006] B. SANZ-IZQUIERDO, F. HUANG y J. BATCHELOR, “Covert dual-band wearable button antenna”, *Electronics Letters*, 42(12):668 – 670, junio 2006.
- [Tronquo et al., 2006] A. TRONQUO, H. ROGIER, C. HERTLEER y L. VAN LANGENHOVE, “Robust planar textile antenna for wireless body LANs operating in 2.45 GHz ISM band”, *Electronics Letters*, 42(3):142 – 143, febrero 2006.
- [Ziolkowski y Erentok, 2007] R. ZIOLKOWSKI y A. ERENTOK, “At and below the chu limit: passive and active broad bandwidth metamaterial-based electrically small antennas”, *Microwaves, Antennas Propagation, IET*, 1(1):116 –128, february 2007.